

FLÁVIO SOUZA SANTOS

**SELEÇÃO DE VARIÁVEIS E DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO
PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Santos, Flávio Souza, 1988-
S237s Seleção de variáveis e definição de zonas de manejo para
2017 agricultura de precisão / Flávio Souza Santos. – Viçosa, MG,
2017.

ix, 55f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Fábio Lúcio Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Solos - Manejo. 3. Análise
multivariada. 4. Mecanização agrícola. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

FLÁVIO SOUZA SANTOS

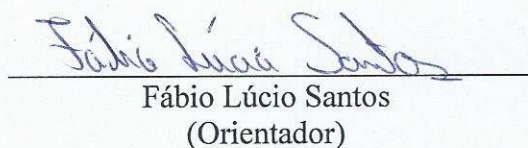
**SELEÇÃO DE VARIÁVEIS E DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO PARA
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 07 de dezembro de 2017.


Genécio Crusoé Rocha


Domingos Sávio Magalhães Valente
(Coorientador)


Fábio Lúcio Santos
(Orientador)

Whether you think you can, or you think you can't--you're right.
(Henry Ford)

*Nenhum homem realmente produtivo pensa como se estivesse escrevendo uma
dissertação.*
(Albert Einstein)

Sucesso não é o final, falhar não é fatal: é a coragem para continuar que conta.
(Winston Churchill)

Dedico este trabalho aos meus pais, meus amores que por mim tanto fizeram e fazem sem medirem esforços. Obrigado pelo amor, carinho, conselhos e por confiarem em mim. Este trabalho é fruto de todo amor e educação que me proporcionaram. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me presenteado pelos meus pais, Nina e Zezé, e terem acreditado e me apoiado neste projeto desde o início, sem os quais não teria sido possível realiza-lo.

Aos professores Domingos Sárvio e Fábio Lúcio pela constante presença, paciência, confiança e conselhos por meio às orientações.

Ao professor Francisco A. C. Pinto pelas valiosas observações e contribuições ao trabalho.

Ao meu padrinho Duda que, antes de se eternizar, contribuiu com este trabalho garantindo que as amostras chegassem ao seu destino com todo carinho e segurança possível.

Aos colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola e Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial (Provisagro), Diego, Ely, Gregory, Jéssica, Amélia, Emanuel, Juliana, Gustavo Guedes, Thiago Furtado, Gustavo Sant'Ana, Tiago Mencaroni, Cleonice, Thales, Marco, Bruno, Marconi, Lucas Corrêdo, Paulo e Anderson, pelo apoio e parceria durante o mestrado, e pelas relevantes discussões científicas.

Aos amigos da República Máfia, Igor Lopes, Rafael Cabral, Rafael Moreti e Eduardo Souto, pela convivência, paciência e irmandade durante os desafios do mestrado.

Ao professor Genelício, pela oportunidade à Iniciação Científica durante a graduação, contribuindo com a minha formação. Assim como ao companheiro Wesly Jeune pelas boas conversas, orientação e conselhos.

A empresa Proplanta, em nome do José Giongo e Alex Tristão, por terem contribuído, financeiramente e estruturalmente, para o estudo em Barreiras e São Desidério, Bahia. E à empresa Geocarta, em nome do Thomas Pitrat, por ter cedido o equipamento ARP®.

Aos amigos e amigas de Ponte Nova que, de alguma maneira, sempre estiveram presentes.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa concedida, e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade e apoio.

A todos demais familiares e amigos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

FLÁVIO SOUZA SANTOS, filho de José Flávio dos Santos e Rosa Maria de Souza Santos, nasceu no município de Ponte Nova, Minas Gerais, no dia 16 de setembro de 1988.

Em agosto de 2009 ingressou no curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), graduando-se em julho de 2015.

Em agosto de 2015, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFV, à nível de Mestrado, na área de Mecanização Agrícola, submetendo-se à defesa de dissertação para a obtenção do título *Magister Scientiae*.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
3. CAPÍTULO 1 - SELEÇÃO DE VARIÁVEIS CORRELACIONADAS COM A PRODUTIVIDADE PARA DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO.....	7
3.1. INTRODUÇÃO	9
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.4. CONCLUSÕES	28
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
4. CAPÍTULO 2 - DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO POR MEIO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA PELA FÍSICA DO SOLO	33
4.1. INTRODUÇÃO	35
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	37
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.4. CONCLUSÕES	49
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
5. CONCLUSÃO GERAL.....	55

RESUMO

SANTOS, Flávio Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2017. **Seleção de variáveis e definição de zonas de manejo para agricultura de precisão.** Orientador: Fábio Lúcio Santos. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente e Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

O presente trabalho objetivou avaliar os atributos do solo e outras variáveis em um sistema produtivo para a delimitação de zonas de manejo (ZM) e adoção da agricultura de precisão em uma área de cerrado, e a influência dos atributos físicos do solo na delimitação das ZM utilizando a condutividade elétrica aparente do solo (CEa). O trabalho foi realizado em uma área no oeste do estado da Bahia, cultivada com soja em 204 hectares no município de São Desidério. O estudo compreendeu o levantamento de informações na propriedade por meio de sensores de condutividade elétrica aparente do solo, uso de imagens de satélite para obter o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), além da coleta de amostras físicas e químicas do solo. As amostras físicas compreenderam em amostras deformadas para análise granulométrica e química, e amostras indeformadas, retiradas utilizando anel volumétrica para avaliar a densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo. No primeiro momento foram estudados os dados adquiridos pelos sensores, imagens e amostras deformadas, além dos dados de produtividade do ciclo da cultura. Estes dados foram analisados perante uma análise multivariada por meio do método dos Mínimos Quadrados Parciais por Análise Discriminante - PLS-DA ("Partial Least Squares for Discriminant Analysis"). A PLS-DA possibilitou selecionar as melhores variáveis para definir as ZM, sendo areia total, argila, potássio, NDVI, condutividade elétrica aparente do solo à 0,20 m e a CEa à 1,00 metro de profundidade. Em segundo momento foram estudadas, além dos dados de CEa e amostras físicas deformadas de solo, as amostras indeformadas. As amostras indeformadas foram avaliadas dentro as ZM definidas pela CEa, com consequente comparação entre suas medias nas respectivas ZM. Para este estudo os atributos físicos do solo não foram relevantes para que influenciassem na delimitação das ZM definidas pela CEa.

ABSTRACT

SANTOS, Flávio Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2017. **Selection of variables and definitions of management zones for precision agriculture.** Adviser: Fábio Lúcio Santos. Co-Advisers: Domingos Sárvio Magalhães Valente and Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

The objective of this study was to evaluate soil attributes and other variables in a productive system for the delimitation of management areas (ZM) and adoption of precision agriculture in a savannah area, and the influence of soil physical attributes on the delimitation of the ZM using the apparent electrical conductivity of the soil (CEa). The work was carried out in an area in the western state of Bahia, cultivated with soybean in 204 hectares in the municipality of São Desidério. The study included the collection of information on the property by means of sensors of apparent electrical conductivity of the soil, use of satellite images to obtain the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), as well as the collection of physical and chemical soil samples. The physical samples comprised deformed samples for granulometric and chemical analysis, and undisturbed samples, using a volumetric ring to evaluate the density, macroporosity, microporosity and total porosity of the soil. In the first moment the data acquired by the sensors, images and deformed samples, besides the crop cycle productivity data, were studied. These data were analyzed by a multivariate analysis using the Partial Least Squares for Discriminant Analysis (PLS-DA) method. The PLS-DA made it possible to select the best variables to define the ZM, being total sand, clay, potassium, NDVI, apparent electrical conductivity of the soil at 0.20 m and CEa at 1.00 m depth. In the second moment, besides the data of CEa and deformed physical samples of soil, the undisturbed samples were studied. The undeformed samples were evaluated within the Za defined by the CEa, with consequent comparison between their means in the respective ZM. For this study the soil physical attributes were not relevant to influence the delimitation of the ZM defined by the CEa.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A soja é um dos principais produtos agrícolas do agronegócio mundial. A cultura apresenta bom cenário internacional quanto à comercialização, estando ligado a vários produtos do complexo agroindustrial. De acordo a Conab (2017), para a safra 2016/2017 houve o crescimento de 18,4% na produção de soja, e 1,8% na área plantada, comparado à safra anterior, chegando a 113 milhões de toneladas, com produtividade média de 3.362 kg ha⁻¹, sendo a principal cultura cultivada no Brasil, apresentando um pacote tecnológico de nível elevado. Uma vez que os produtores visam aumentar a produtividade, é importante a manutenção da sustentabilidade econômica e ambiental. Dessa forma, busca-se o uso racional e eficiente dos insumos por meio de novas técnicas de gerenciamento da produção agrícola.

Em se tratando da viabilidade econômica da produção de soja, uma maneira de se otimizar a atividade é através da agricultura de precisão (AP). Nesse caso, as práticas agronômicas podem ser orientadas por meio da variabilidade espacial e temporal da lavoura, sendo o resultado da interação dos atributos do solo e do manejo (Alcântara et al., 2015). Na AP, o manejo de cada área da propriedade leva em consideração suas características específicas, como a fertilidade e atributos referentes à física do solo, que assim como o primeiro, deve também ser considerada um fator de grande importância. Propriedades do solo como a matéria orgânica, conteúdo de água (Sopchleous, 2015), teor de argila (Moral et al., 2010) e a densidade dos solos (Mossadeghi-Björklund, 2016) são fundamentais para o bom desenvolvimento da lavoura, sendo informações relevantes ao aplicar a AP.

Para gerenciar o manejo da propriedade agrícola por meio da AP é necessário levantar informações detalhadas da cultura e do ambiente edáfico, de modo que o conhecimento da qualidade física e química do solo é importante tanto para a condução quanto para o acompanhamento da cultura. Desse modo, pode-se conhecer quais os fatores são limitantes à produção, possibilitando avaliar e adaptar, caso necessário, o manejo. Uma maneira de manter o acompanhamento e obter de forma rápida informações edáficas, é por meio do uso da medição da condutividade elétrica aparente do solo (CEa). A CEa é uma propriedade que leva em consideração a importância das propriedades físicas e químicas do solo (Ahire et al., 2013; Chaudhari e Ahire, 2013).

A condutividade elétrica do solo é a capacidade que este tem em conduzir ou transmitir corrente elétrica (Cancela et al., 2016). A CEa pode ser aplicada por estar relacionada a variáveis do solo como salinidade, umidade e teor de argila (Moghadas et al., 2016). De acordo com Chik e Islam (2011), a CEa está ligada às alterações de partículas, que influenciam mais que as características químicas na caracterização do solo. E sendo o solo um sistema variável espacialmente, pode-se utilizar a CEa para caracterizar essa variabilidade, podendo reduzir o número de amostras e definir zonas de manejo (Moral et al., 2010; Peralta et al., 2015).

As zonas de manejo (ZM) são sub-regiões com relativa homogeneidade em relação aos atributos solo-paisagem (Haghverdi et al., 2015). Sendo assim, as ZM podem implementar estratégias locais considerando um manejo individualizado (Peralta e Costa, 2013). A vantagem da geração das ZM por meio do uso da CEa, está no fato dela auxiliar no mapeamento da variação espacial de atributos do solo (Terrón et al., 2011), contribuindo para reduzir o número de amostras (Alves et al., 2013; Valente et al., 2012a). Dessa maneira, pode-se direcionar os locais de amostragem do solo respeitando as características do solo em comum e tornar o processo menos oneroso, conferindo-se bom potencial da utilização da CEa na geração de zonas de manejo (Brito et al., 2014).

Para selecionar as variáveis que melhor definiriam as ZM, torna-se necessário utilizar métodos multivariados para realizar a análise dos dados, devido às inúmeras interações existentes entre os fatores no ambiente produtivo (Corá et al., 2004). A análise multivariada do conjunto de dados possibilita um estudo entre todas as variáveis envolvidas, independentemente ou não de alta-correlação existente entre elas (Oliveira, 2014). Dessa forma, entre tantos fatores que influenciam a produtividade, a seleção de variáveis para definir zonas de manejo revela o potencial da agricultura de precisão para maximizar o rendimento financeiro da atividade agrícola (Tschiedel e Ferreira, 2002).

Este trabalho se inicia com esta introdução geral que contextualiza a justificativa do trabalho. O trabalho está dividido em dois capítulos, sendo o objetivo de o primeiro identificar e ratificar a importância da seleção dos atributos relacionados à produtividade que podem influenciar o planejamento da lavoura. O segundo capítulo apresenta uma avaliação da relação da CEa com os atributos físicos do solo, visando obter o melhor uso das ferramentas que fomentam a agricultura de

precisão. Por fim, está apresentada a conclusão geral, apresentando as considerações finais de cada capítulo do trabalho.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahire, D. V., Chaudhari, P. R., Ahire, V. D., & Patil, A. A. (2013). Correlations of electrical conductivity and dielectric constant with physico-chemical properties of black soils. *Int. J. Sci. Res. Pub*, 3(2), 1-16.

Alves, S. M., Alcântara, G. R., Reis, E. F., Queiroz, D. M., & Valente, D. S. M. (2013). Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. *Bioscience Journal, Uberlândia*, 29(1), 104-114.

Alcântara, G. R. D. (2015). Variabilidade espacial e temporal da produtividade de milho e soja e sua relação com os atributos do solo.

ALCÂNTARA, E. D., & Ferreira, M. M. (2000). Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. *Revista brasileira de ciência do solo*, 24(4).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. PIB da agropecuária tem alta de 1,8% em 2015. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2016/03/pib-da-agropecuaria-tem-alta-de-1porcento-em-2015>>. Acesso em: 08 nov 2016.

Brito, M. D. D. (2014). Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta à silvicultura de precisão.

Cancela, J. J., Fandiño, M., Rey, B. J., Dafonte, J., & González, X. P. (2017). Discrimination of irrigation water management effects in pergola trellis system vineyards using a vegetation and soil index. *Agricultural Water Management*, 183, 70-77.

Chik, Z., & Islam, T. (2011). Study of chemical effects on soil compaction characterizations through electrical conductivity. *Int. J. Electrochem. Sci*, 6, 6733-6740.

Conab – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. SAFRA 2016/17. ISSN 2318-6852; V.4,N.8 – Oitavo Levantamento, p. 144, 2017. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_05_12_10_37_57_boletim_gaos_mai_2017.pdf, Acesso em: 10/11/2017.

Corá, J. E., Araújo, A. V., Pereira, G. T., & Beraldo, J. M. G. (2004). Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28(6).

Solos, E. (1997). Manual de métodos de análise de solo. *Rio de Janeiro: Embrapa Solos*.

Haghverdi, A., Leib, B. G., Washington-Allen, R. A., Ayers, P. D., & Buschermohle, M. J. (2015). Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 154-167.

Hirakuri, M. H., & Lazzarotto, J. J. (2014). O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. *Documentos Embrapa, Londrina*, (349).

Tschiedel, M., & Ferreira, M. F. (2002). Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. *Ciência Rural*, 32(1).

Moghadas, D., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Triantafilis, J. (2016). Probabilistic inversion of EM38 data for 3D soil mapping in central Iran. *Geoderma Regional*, 7(2), 230-238.

Mossadeghi-Björklund, M., Arvidsson, J., Keller, T., Koestel, J., Lamandé, M., Larsbo, M., & Jarvis, N. (2016). Effects of subsoil compaction on hydraulic properties and preferential flow in a Swedish clay soil. *Soil and Tillage Research*, 156, 91-98.

Moral, F. J., Terrón, J. M., & Da Silva, J. M. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 335-343.

Oliveira, K. D. S. (2014). Análise de requeijão por espectroscopia raman e ferramentas quimiométricas.

Chaudhari, P. R., & Ahire, D. V. (2013). Electrical conductivity and dielectric constant as predictors of chemical properties and available nutrients in the soil. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences (JCBPS)*, 3(2), 1382.

Peralta N.R., Costa J.L, 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutriente management. *Comp. Electron. Agric.* 99: 218-226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.09.014>.

Peralta, N.R.; Costa, J.L.; Balzarini, M.; Castro, F.M.; Córdoba, M.; Bullock, D.; 2015. **Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat.** *Comp. Electron. Agric.* 110: 103-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.10.017>.

Sophocleous, M., & Atkinson, J. K. (2015). A novel thick-film electrical conductivity sensor suitable for liquid and soil conductivity measurements. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 213, 417-422.

Terrón, J.M., Marques da Silva, J.R., Moral, F.J. et al. *Precision Agric* (2011) 12: 750. doi: 10.1007/s11119-011-9218-5.

Tschiedel, M., & Ferreira, M. F. (2002). Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. *Ciência Rural*, 32(1).

Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. D., Pinto, F. D. A. D. C., Santos, N. T., & Santos, F. L. (2012b). Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. *Scientia Agricola*, 69(3), 173-179.

Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. D., Pinto, F. D. A. D. C., Santos, N. T., & Santos, F. L. (2012a). The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. *Revista Ciência Agronômica*, 43(4), 683-690.

3. CAPÍTULO 1

SELEÇÃO DE VARIÁVEIS CORRELACIONADAS COM A PRODUTIVIDADE PARA DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO

Resumo: A agricultura de precisão otimiza a atividade agrícola tanto no âmbito econômico quanto ambiental, dessa forma, delimitar zonas de manejo (ZM) por meio de variáveis mais correlacionadas com a produtividade. Dessa forma, este trabalho objetivou selecionar as variáveis mais correlacionadas com a produtividade, por meio de uma análise multivariada, para delimitar zonas de manejo. O estudo foi conduzido em uma fazenda de cultivo de soja no oeste do estado da Bahia, na cidade de São Desidério, em uma área de 204 ha. Foram levantadas informações quanto à física e química do solo, Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e condutividade elétrica aparente do solo (CEa). Foram geradas ZM com todas as variáveis do estudo, sendo todas comparadas posteriormente com a ZM da produtividade, sendo submetidas às comparações referente ao coeficiente de concordância Kappa. A CEa à um metro de profundidade foi a variável que melhor correlacionou com a produtividade.

CHAPTER 1

SELECTION OF CORRELATED VARIABLES WITH PRODUCTIVITY FOR DELIMITATION OF MANAGEMENT ZONES

Abstract: Precision agriculture optimizes agricultural activity in both, economic and environmental spheres. Delimiting management zones (MZ) through variables correlated with productivity becomes an efficient practice. Thus, this study aimed to select the variables correlated with productivity, through a multivariate analysis. The study was conducted on a soybean farm in the western state of Bahia, in the city of São Desidério, in an area of 204 ha. Information about soil physics and chemistry, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and apparent soil electrical conductivity (ECa) were collected. MZ were generated with a total variable collected of the study. These variables were compared with MZ generated by yield. Kappa coefficient was determined to compare MZ generated by variables with MZ generated by yield. The best variable selected that better correlated with MZ yield was ECa to one meter of depth.

3.1. INTRODUÇÃO

A necessidade por métodos mais eficientes no processo de produção agrícola exige demandas cada vez maiores nas técnicas empregadas no campo. Logo, o gerenciamento sustentável das práticas de aplicação dos insumos é uma necessidade das propriedades agrícolas. Partindo dessa premissa, é fundamental levar em consideração os fatores sociais, econômicos e ambientais na utilização de insumos. Atendendo esses princípios, a agricultura de precisão (AP) fornece uma abordagem que visa otimizar os insumos utilizados, melhorando sua eficiência e reduzindo os problemas ambientais, gerenciando os tratamentos de forma otimizada para determinado local da propriedade (Gebbers e Adamchuck, 2010).

A AP propõe um manejo da propriedade que respeite a distribuição espacial dos atributos do solo e otimize a produtividade agrícola (Alves et al., 2013). Na AP, o manejo de cada área da propriedade leva em consideração suas características específicas, como a fertilidade e atributos de física do solo. Dentre as técnicas utilizadas para as práticas de AP, tem-se o uso das zonas de manejo (ZMs) que, segundo Luchiari Junior et al. (2000), são áreas de potencial semelhança produtiva e de eficiência no uso de insumos.

As ZMs do solo são áreas que apresentam fatores limitantes semelhantes, o que possibilita reduzir o número de amostras e de obter um gerenciamento de campo mais econômico (Moral, 2010). Os fatores limitantes, associados à produtividade, permitem a definição das ZMs, uma vez que esta responde, entre outras, às características do solo (Molin, 2002). As ZMs podem ser definidas tanto pelos atributos físicos e químicos do solo (Alves et al., 2013), elevação do terreno (Melo et al., 2017), ou por sensores que respondem às condições da lavoura (Safanelli, Boesing, e Bottega, 2015).

A escolha das variáveis para a definição de ZMs é de grande importância em uma avaliação conjunta de todos os dados disponíveis, levando em consideração a interação entre as variáveis químicas e físicas do solo. Dentre os métodos que podem ser utilizados para a seleção de variáveis para a delimitação de ZMs, destaca-se a Análise de Componentes Principais - ACP (Moral et al., 2010). Entretanto, para delimitar ZMs empregando-se dados de produtividade, o método dos Mínimos Quadrados Parciais por Análise Discriminante - PLS-DA (“Partial Least Squares for Discriminant Analysis”) se torna mais indicado, pois diferentemente da ACP, o PLS-

DA é caracterizado como um método supervisionado, permitindo a classificação das amostras nas ZMs. O PLS-DA permite separar as amostras atribuindo-as em classes (Ballabio e Consonni, 2013). Dessa maneira, pode-se verificar quais fatores químicos e físicos do solo estão sendo os mais influentes na produtividade da área. Entretanto, essa aplicação do método PLS-DA para a seleção de fatores relacionados à produtividade, ainda se apresenta incipiente na seleção de variáveis que melhor delimitam as ZMs da lavoura.

Para que seja possível avaliar e inferir sobre o nível de importância de cada variável na área de produção, deve-se conhecer a variabilidade da produtividade. A partir de um mapa da variabilidade da produtividade, pode-se identificar a diferença de produção da lavoura. Este mapa da produtividade pode proporcionar uma melhor tomada de decisão de manejo do solo, auxiliando na prescrição da adubação a doses variadas (McKinion et al., 2010). Entretanto, vale ressaltar que produtividade não se limita apenas aos fatores edáficos, sendo também influenciada pela época de semeadura, manejo de plantas invasoras, pragas e doenças (Sangoi, 2007).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi selecionar variáveis correlacionadas com a produtividade, em uma área com cultivo de soja, a partir de uma análise multivariada para delimitação de zonas de manejo.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no município de São Desidério, no oeste do Estado da Bahia, em um talhão da Fazenda São Jorge, de área de 204 ha, cultivado com soja (*Glycine max*). O cultivo de soja na área foi iniciado em 2014, estando a área coberta pela vegetação de cerrado antes da implantação da cultura.

A altitude média na área de estudo é de 493 m, possui relevo plano, com a predominância de Latossolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa (Embrapa, 2013). O clima da região apresenta inverno seco e verão chuvoso, sendo caracterizado como do tipo Aw tropical úmido (Köppen, 1928).

Foram coletadas amostras para a determinação das propriedades físicas e químicas do solo, condutividade elétrica aparente do solo (CEa) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), para a realização de estudos sobre as ZM na área. A variável resposta utilizada foi a produtividade da cultura da soja, em toneladas por hectare.

A coleta de dados, para análise química e física do solo, foi realizada na área de 204 ha, onde os pontos de amostragem foram previamente determinados para a coleta de uma amostra composta por hectare (Figura 1). Cada amostra composta foi representada por oito amostras simples coletadas à 0,20 m de profundidade em um raio de 10 metros em torno do ponto central da grade amostral. Sendo assim, foram coletadas 204 amostras compostas de solo para a análise química, de matéria orgânica e de textura do solo.

As análises químicas e físicas foram realizadas, respectivamente, no Laboratório de Rotina de Fertilidade do Solo e o Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Nas análises químicas foram determinados os valores de pH pela solução solo-água 1:2,5; fósforo (P) e potássio (K^+) pelo extrator Mehlich-1; cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), alumínio trocável (Al^{3+}) pelo extrator KCl 1 mol L^{-1} ; acidez potencial ($H + Al$) pelo extrator acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} ; matéria orgânica pelo método Walkley-Black; enxofre (S) pelo extrator fosfato monocalcico em ácido acético; fósforo remanescente (P-Rem) pela solução $CaCl_2$ 10 mmol L^{-1} ; e soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t), capacidade de troca catiônica à pH 7 (T), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), por meio descrição do manual de métodos de análise de solo da Embrapa (Embrapa, 1997). Na análise física foi determinada a

granulometria (areia grossa, areia fina, silte e argila), segundo Ruiz (2005a) e Ruiz (2005b).

O software utilizado para determinar os pontos de coleta e gerar a grade amostral foi o QGIS, versão 2.16.3, programa livre licenciado pela GNU General Public License. Para a locação dos pontos na área, foi utilizado um GPS Portátil da marca Garmin, modelo Etrex® 30x.

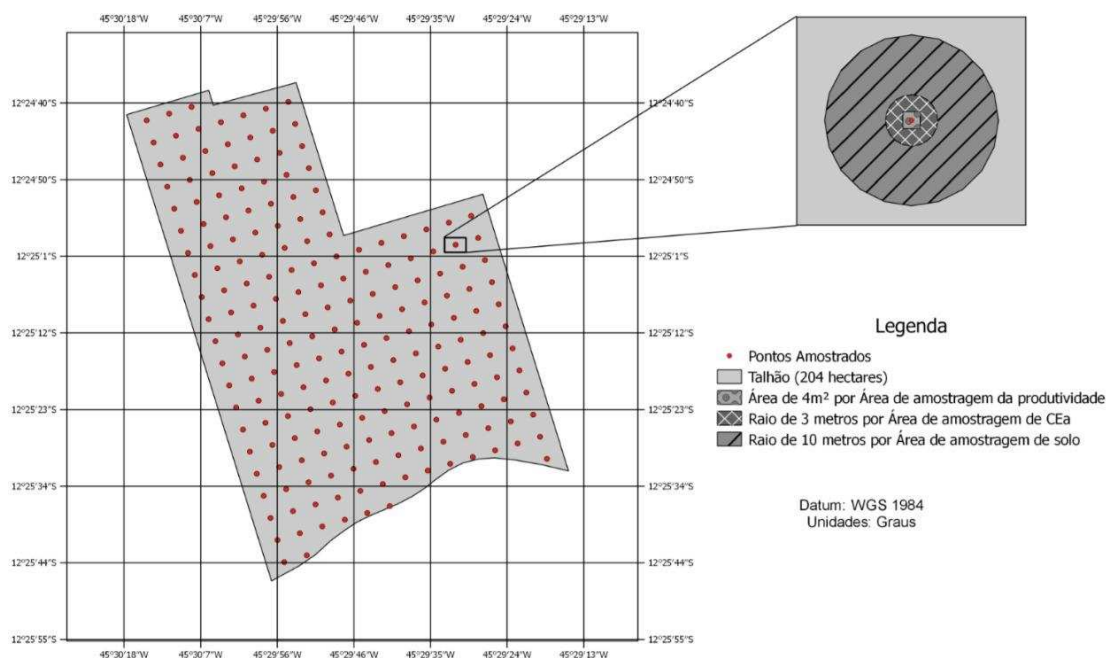


Figura 1 – Planejamento da grade de amostragem de solo, apresentando os 204 pontos de coleta, de onde foram retiradas informações para avaliar a física e química do solo, e a de condutividade elétrica aparente do solo.

Para o cálculo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) no QGIS foram utilizadas as bandas 4 e 5 do sensor OLI (*Operation Land Imager*) do satélite Landsat-8, com resolução espacial de 30 m. A imagem utilizada referente ao dia 22/01/2017, se deu pela lavoura apresentar o máximo de nós do desenvolvimento vegetativo, relacionando-se a produção potencial de vagens na planta da soja. A imagem foi submetida à correção radiométrica, de forma a converter o valor do número digital de pixel para reflectância.

Para a estimativa da produtividade, foi utilizada a mesma malha amostral empregada para as análises química e física do solo (Figura 1). Para determinar o mapa de produtividade, foram coletadas amostras de grãos (no dia 15/03/2017) em uma área de quatro metros quadrados no centro de cada ponto amostral. Foi

Utilizou-se o PLS-DA para classificar as amostras de solo coletadas em função da produtividade, assim como para a seleção das variáveis. A denominação “variáveis” neste trabalho faz referência, unicamente, a todos os atributos físicos e químicos do solo analisados, assim como para o NDVI e às CEa nas camadas do perfil do solo. Uma matriz [X] e um vetor {y} foram gerados para a execução do PLS-DA. A matriz [X] continha 204 linhas referente às amostras de solo e 25 colunas correspondendo aos parâmetros físicos e químicos do solo. O vetor {y} continha 204 valores de produtividade. Os fatores obtidos pela PLS-DA foram denominados como variáveis latentes (VL), em que a primeira considera as informações presentes no vetor {y}.

A seleção das variáveis na PLS-DA foi feita com base no cálculo dos valores de importância da variável para a projeção (Variable Importance on Projection - VIP) para cada variável (Wold, Sjöström, e Eriksson, 2001; Mehmood, Liland, Snipen, e Sæbø, 2012). O valor VIP valida a seleção das variáveis de maior relevância, pois indica a importância de cada variável independente da matriz [X] para a modelagem com vetor {y}. Isso significa que o valor VIP fornece um parâmetro comprovado da influência das variáveis na produtividade. Logo, o VIP foi também utilizado para identificar variáveis relevantes para discriminar as classes (Heim et al., 2015). Seu valor foi basicamente encontrado realizando o cálculo da contribuição de cada variável em cada uma das variáveis latentes em relação à soma de quadrados total da regressão. As variáveis com valor VIP menor que um não possuem impacto na classificação (Yang et al., 2016). Desse modo, seguindo a metodologia proposta por Mehmood et al. (2012), apenas as variáveis com valor VIP maior que um foram selecionadas para a geração das ZM.

Foi criada uma zona de manejo (ZM) com as amostras de produtividade coletadas em cada ponto da malha amostral (Figura 1). As amostras foram classificadas em duas diferentes classes de produtividade: alta e baixa. Em seguida, uma vez selecionadas as variáveis pelo PLS-DA, o software QGIS foi utilizado para gerar os mapas das ZM para fins de comparação entre as ZM da produtividade e das variáveis deste estudo. Todos os mapas dos dados utilizados foram interpolados utilizando o Inverso da Distância ao Quadrado (IDW), apresentando cada pixel do mapa a resolução de 30 x 30 m.

Inicialmente gerou-se a ZM com a produtividade. Esta ZM foi utilizada como base de comparação para as demais. Em um segundo momento, foram geradas ZM

utilizando todas as variáveis utilizadas no trabalho, exceto a produtividade. Em seguida, somente, foram geradas ZM pelas variáveis selecionadas por meio da PLS-DA. Essas ZM foram geradas para cada variável selecionada em duas classes. Por fim, foram geradas ZM a partir da combinação entre as variáveis selecionadas que não estavam correlacionadas. Adicionalmente, foram geradas ZM combinando-se, duas a duas, as variáveis nas três camadas da CEa e o NDVI. Essa combinação foi feita para as variáveis que apresentaram os melhores valores de VIP. Essa combinação foi realizada pelo fato dessas variáveis serem de fácil obtenção e de baixo custo de aquisição sendo, portanto, variáveis importantes para definir zonas de manejo.

Para realizar as comparações entre os mapas de ZM definidas e o mapa de produtividade classificado em duas classes, foi utilizado o coeficiente de concordância Kappa. O software Krig-Me (Valente et al., 2012) foi utilizado para calcular o coeficiente de concordância Kappa (Equações 1, 2 e 3). Por este coeficiente os padrões dos mapas de ZM geradas com as variáveis, foram comparados com os padrões dos mapas de ZM geradas pela produtividade nas respectivas classes.

$$\hat{K} = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i})}{n^2 - \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i})} \quad (1)$$

em que,

$\hat{K}$ = Estimativa do coeficiente Kappa;

x_{ii} = valor na linha i e coluna i da matriz de erros;

$x_{i\oplus}$ = total da linha i;

$x_{\oplus i}$ = total da coluna i;

n = total de observações;

c = número total de classes.

O nível de concordância da comparação entre os mapas foi realizado por meio da classificação com a escala proposta por Landis e Koch (1977). A proposta respeita os valores Kappa com suas respectivas classificações de concordâncias: menores que zero (muito ruim), entre zero e 0,20 (ruim), entre 0,21 e 0,40 (razoável), entre 0,41 a 0,60 (boa), entre 0,61 a 0,80 (muito boa), e entre 0,81 e 1,00 (excelente).

Os valores do coeficiente Kappa, obtidos na comparação entre cada uma das ZM geradas e a ZM da produtividade, foram avaliados empregando-se a estatística Z (Equação 2) ao nível de 5% de probabilidade, conforme Congalton e Mead (1986).

$$Z_{\text{cal}} = \frac{\hat{K}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2(k)}} \quad (2)$$

em que,

Z_{cal} = Estatística Z padronizada e distribuída normalmente;

$\hat{\sigma}^2$ = Variância do coeficiente Kappa.

A variância do coeficiente Kappa foi calculada por meio da Equação 3.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_1)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2-\theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4-4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (3)$$

em que,

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c x_{ii} ;$$

$$\theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i})$$

$$\theta_3 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c x_{ii}(x_{i\oplus} + x_{\oplus i})$$

$$\theta_4 = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c x_{ij}(x_{j\oplus} x_{\oplus j})^2$$

A diferença entre os dois coeficientes Kappa independentes ($\hat{K}_1$ e $\hat{K}_2$) foi verificada, ao nível de 5% de probabilidade, a partir da Equação 4 (Congalton e Mead, 1986).

$$z = \frac{\hat{K}_1 - \hat{K}_2}{\sqrt{\hat{\sigma}(\hat{K}_1) - \hat{\sigma}(\hat{K}_2)}} \quad (4)$$

em que,

Z = Estatística Z padronizada e normalmente distribuída;

$\hat{\sigma}$ = Variância do coeficiente Kappa.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O coeficiente de variação (CV) das variáveis analisadas variou entre 3,59% e 1.424,78% (Tabela 1). Os três maiores CV pertenceram à característica química do solo, sendo o alumínio trocável (Al^{3+}), saturação por alumínio (m) e enxofre (S). Esta observação corrobora com o estudo realizado por Coelho (1983), que afirma que há maior variação das características químicas do solo em relação às físicas. Baixos valores de coeficiente de variação possibilitam realizar amostragem de baixa densidade de um nutriente na área, tendo a vantagem de exigir baixo número de amostras para representá-la na área (Souza et al., 2006).

Tabela 1. Estatística descritiva das características químicas e granulométricas do solo estudado.

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV(%)
pH ¹	5,53	0,29	4,88	6,29	5,24
P ²	15,25	12,64	4,8	142,9	82,89
K ³	66,78	20,06	28	127	30,04
Ca ⁴	1,66	0,35	1,01	2,78	21,18
Mg ⁵	0,65	0,18	0,21	1,24	28,33
Al ⁶	0,01	0,03	0,00	0,30	445,57
H+Al ⁷	2,59	0,65	1,00	6,00	25,18
SB ⁸	2,48	0,53	1,47	4,20	21,28
t ⁹	2,49	0,52	1,47	4,20	20,90
T ¹⁰	5,07	0,73	3,08	8,75	14,40
V ¹¹	49,16	8,90	26,8	70,00	18,11
m ¹²	0,37	1,66	0,00	15,70	446,05
MO ¹³	0,77	0,45	0,00	2,44	58,72
PRem ¹⁴	45,53	4,15	35,2	55,30	9,11
S ¹⁵	0,01	0,20	0,00	2,90	1.424,78
AT ¹⁶	74,58	2,68	63,70	80,30	3,59
AG ¹⁷	27,29	7,14	11,80	49,70	26,17
AF ¹⁸	47,29	7,39	26,70	62,40	15,63
SIL ¹⁹	5,17	1,62	2,58	11,09	31,41
ARG ²⁰	20,25	2,03	15,41	28,75	10,00
CE20 ²¹	2,05	1,05	0,16	7,35	51,47
Produt ²²	37,04	7,15	17,58	59,38	19,31
CE50 ²³	1,64	0,58	0,57	3,31	35,63
CE100 ²⁴	1,10	0,36	0,44	2,19	32,63
CE200 ²⁵	0,61	0,19	0,24	1,13	32,02

¹/Acidez ativa em água; ²/Fósforo; ³/Potássio; ⁴/Cálcio; ⁵/Magnésio; ⁶/Alumínio trocável; ⁷/Acidez potencial; ⁸/Soma de bases; ⁹/CTC efetiva; ¹⁰/CTC a pH 7; ¹¹/Saturação por bases; ¹²/Saturação por alumínio; ¹³/Matéria orgânica; ¹⁴/Fósforo remanescente; ¹⁵/Enxofre; ¹⁶/Areia total; ¹⁷/Areia grossa; ¹⁸/Areia fina; ¹⁹/Silte; ²⁰/Argila; ²¹/ Condutividade elétrica aparente do solo (CEa) a 0,20 m de profundidade; ²²/Produtividade; ²³/ CEa a 0,50 m; ²⁴/ CEa a 1 m; ²⁵/ CEa a 2 m.

Os valores encontrados para Al³⁺ e saturação por alumínio são baixos, sendo explicados pelo bom manejo do solo realizado. Este manejo do solo busca construir a fertilidade do perfil do solo, cuja finalidade é corrigir a acidez do solo e fornecer os nutrientes necessários a permitir o bom desenvolvimento da lavoura. Este processo possui a finalidade de criar condições favoráveis para o sistema radicular das plantas,

ao contrário da condição natural do solo da lavoura, que apresenta baixos teores de nutrientes e elevada saturação por alumínio (Martins, 2008). Tomando pela sustentabilidade ambiental e econômica da construção do perfil do solo, a AP possibilita identificar a variabilidade espacial da acidez do solo, permitindo aplicar a quantidade necessária de corretivo nas áreas homogêneas (Carneiro et al., 2017).

Os baixos valores de enxofre podem ser explicados pela adubação do enxofre ter sido feita com o superfosfato simples, um fertilizante de alta solubilidade, o que potencializa sua lixiviação em solos arenosos, conforme observado por Osório Filho et al. (2007). Outro fator que contribuiu para o baixo valor de S são os baixos valores de matéria orgânica do solo (MO), estando a média da área abaixo de 8 g Kg^{-1} (Sousa e Lobato, 2004). Fato este que corrobora com Tiecher et al. (2012), mencionando que o S disponível está intimamente ligado à MO. Desse modo, como o S é influenciado pela MO da área, é relevante conhecer a distribuição espacial desta, uma vez que a MO pode ser utilizada na definição de ZM como indicador de variabilidade das propriedades do solo (Alves et al., 2013).

A média dos valores de pH da área contribuem para o desenvolvimento da soja, por proporcionar boas condições de assimilação de nutrientes, como o fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S), e não limitar a disponibilidade de micronutrientes, juntamente com a manutenção da saturação por base (V) na faixa entre 35 e 50% (Korndörfer, 2002). O K é o nutriente mais absorvido pela planta da soja depois do nitrogênio, apresentando a área de estudo bom teor desse nutriente (acima de 50 mg dm^{-3}). Entretanto, é aconselhável realizar a adubação corretiva com cuidado, visto que a porcentagem de argila da área apresentou média de 20%, o que contribuiria para a lixiviação do K (Embrapa, 1996). Segundo Sousa e Lobato (2004), os teores de cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) apresentaram níveis adequados, ratificando assim a correção da acidez do solo natural e, consequentemente, os valores adequados de pH do solo.

Na Figura 3 é apresentado o resultado do PLS-DA para duas classes de produtividade. Na Figura 3a e 3c são apresentadas, respectivamente, as amostras de solo antes e após a separação entre as classes de produtividade. Na Figura 3b e 3d estão apresentadas, respectivamente, o gráfico de todas as variáveis estudadas antes da separação e o gráfico das variáveis selecionadas, baseadas nos valores de VIP maior que um, que melhor separaram as duas classes de produtividade.

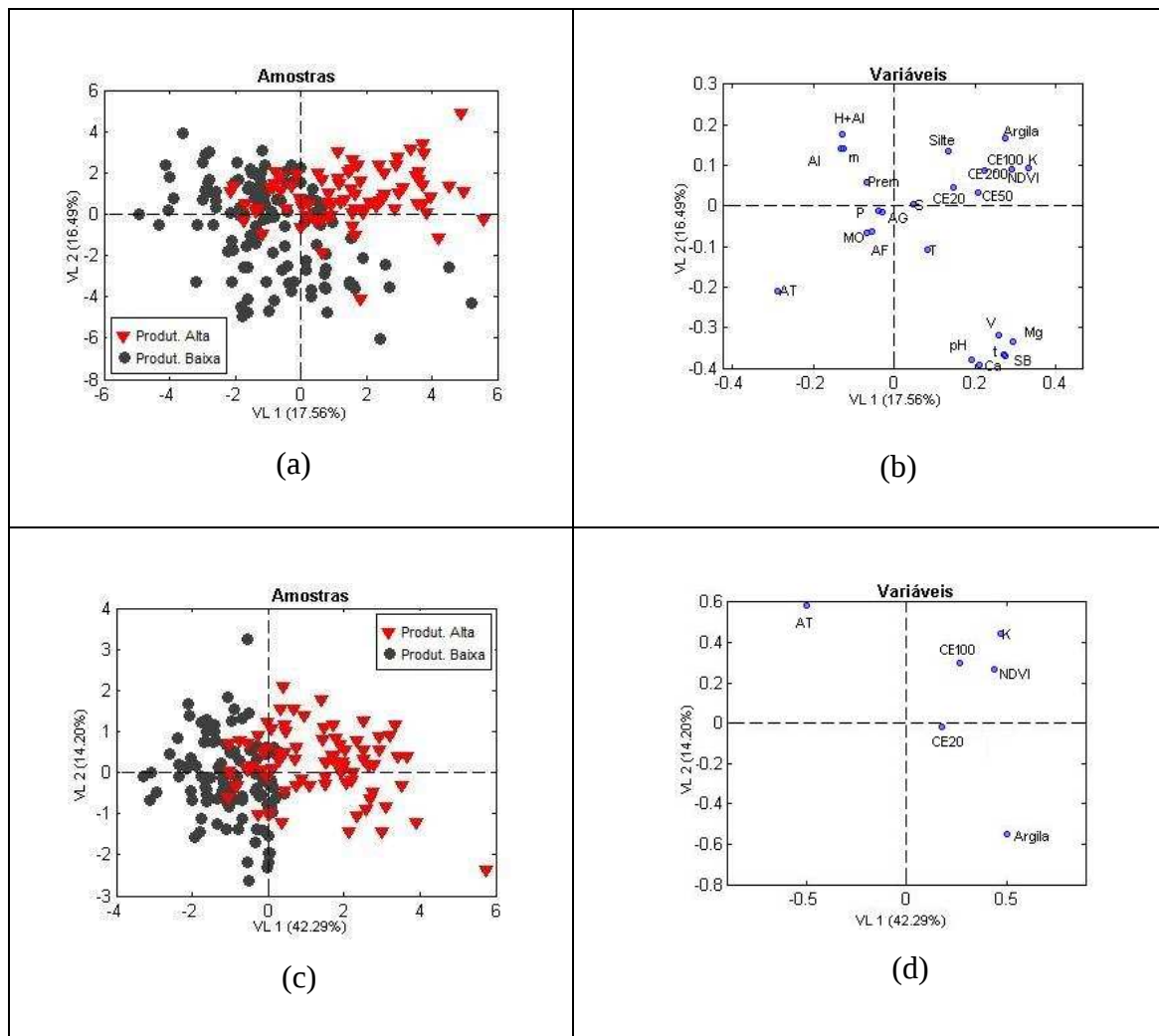


Figura 3. a) Amostras de produtividade em 2 classes; b) Todas as variáveis de solo para 2 classes de produtividade; c) Amostras de solo separadas em 2 classes após seleção de variáveis; d) Variáveis responsáveis pela seleção da produtividade em 2 classes. Onde Al: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; m: Saturação por alumínio; Prem: Fósforo remanescente; S: Enxofre; CE20: Condutividade elétrica aparente do solo (CEa) a 0,20 m de profundidade; CE50: CEa a 0,50 m; CE100: CEa a 1,00 m; CE200: CEa a 2,00 m; K: Potássio; NDVI: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada; T: CTC a pH 7; t: CTC efetiva; V: Saturação por bases; pH: Acidez ativa em água; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; SB: Soma de bases; MO: Matéria orgânica; AG: Areia grossa; AF: Areia fina; P: Fósforo; AT: Areia total.

Nas Figuras 3a e 3c, observa-se que grande parte dos dados de alta produtividade foram classificados no primeiro e quarto quadrante do gráfico. No segundo e terceiro quadrante do gráfico estão localizados a maior parte dos dados de baixa produtividade. Esta classificação da produtividade foi realizada com base nas variáveis localizadas nas Figuras 3b e Figuras 3d. Quanto mais afastada do centro for a variável, maior o peso para classificar os dados em alta ou baixa produtividade.

As variáveis mais centralizadas no gráfico da Figura 3b possuem baixa importância para a separação das amostras de produtividade alta e baixa (Figura 3a). Conforme pode ser evidenciado na Figura 3b, no eixo da VL 1, as amostras de alta produtividade, Figura 3a, acompanham os maiores teores de argila, juntamente com o potássio (K), as três camadas de CE (50, 100 e 200), NDVI, saturação por bases (V), capacidade de troca catiônica efetiva (t) e soma de bases (SB). Na VL 2 as amostras de produtividade alta acompanham as três camadas de CEa (100 e 200), NDVI, K e silte. Observando conjuntamente as Figuras 3a e 3b, e a distribuição das variáveis entre as VL's, percebe-se que as amostras de produtividade alta se encontram no primeiro quadrante (direito superior) do gráfico da Figura 3b.

Já as amostras de menor produtividade apresentam uma textura mais arenosa (e menor teor de argila), fazendo com que sua capacidade de retenção seja menor, explicando os baixos valores dos nutrientes. Essa afirmação pode ser notada na VL 1, estando a maior quantidade de amostras de produtividade baixa acompanhadas da areia total (AT) e acidez potencial (H+Al) e trocável (Al^{3+}). E na VL 2, a produtividade baixa está mais correlacionadas com as variáveis AT, Al^{3+} e H+Al.

As variáveis selecionadas e consideradas mais importantes para a separação das classes de produtividade alta e baixa resulta no comportamento das amostras observado na Figura 3c. Nessa classificação foi considerado as variáveis que apresentaram os maiores valores de VIP. Na Figura 4 é possível observar as variáveis com maiores valores de VIP. As variáveis com menores valores de VIP foram removidas da classificação apresentada na Figura 3.C. Os valores VIP da PLS-DA mostram a importância relativa de cada variável na discriminação entre as amostras de solo classificadas em duas classes de produtividade (Andersen e Bro, 2010). Por estes resultados, nota-se que, as variáveis K, AT, argila, NDVI, CE20 e CE100 apresentaram valores VIP acima de um, consequentemente puderam ser consideradas como as mais importantes para a separação entre as classes.

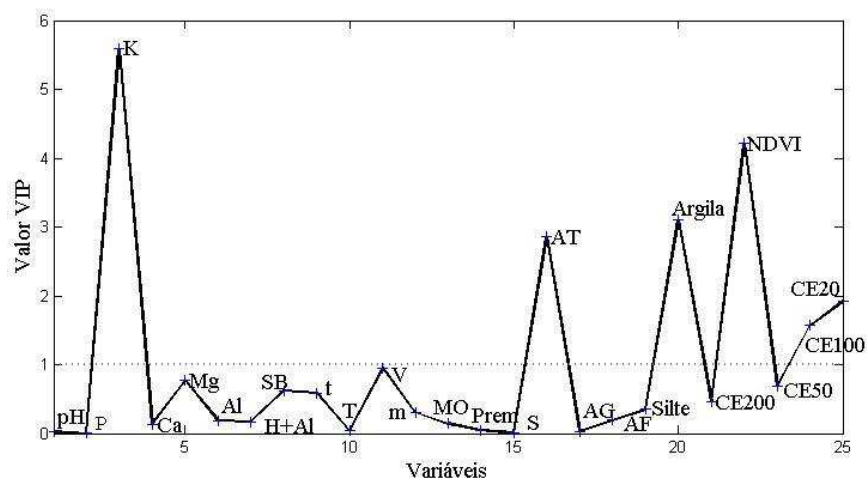


Figura 4. Valores de importância da variável de projeção (VIP) obtidos na discriminação da produtividade de soja classificadas em duas classes.

Observa-se que houve uma melhoria na classificação da produtividade após a seleção das variáveis (Figura 3.C). As variáveis selecionadas NDVI, K e AT foram as responsáveis pela discriminação das amostras de solo de alta e baixa produtividade no eixo da primeira variável latente. Já as variáveis argila, AT e K foram as responsáveis por diferenciar as amostras de solo entre as classes de produtividade no eixo da segunda variável latente. A AT e o K promoveram maior peso na classificação, uma vez que estão mais afastadas do centro do gráfico.

Na Figura 5 estão apresentadas as ZM definidas com base nas variáveis selecionadas e pela combinação entre elas. Como a ideia é definir zonas de manejo com base em variáveis de fácil obtenção, e posteriormente realizar uma análise de solo em cada zona de manejo definida. O potássio não foi considerado para definição de ZM no processo de combinação entre as variáveis. O potássio foi adicionado na análise com uma única variável apenas por efeito de comparação.

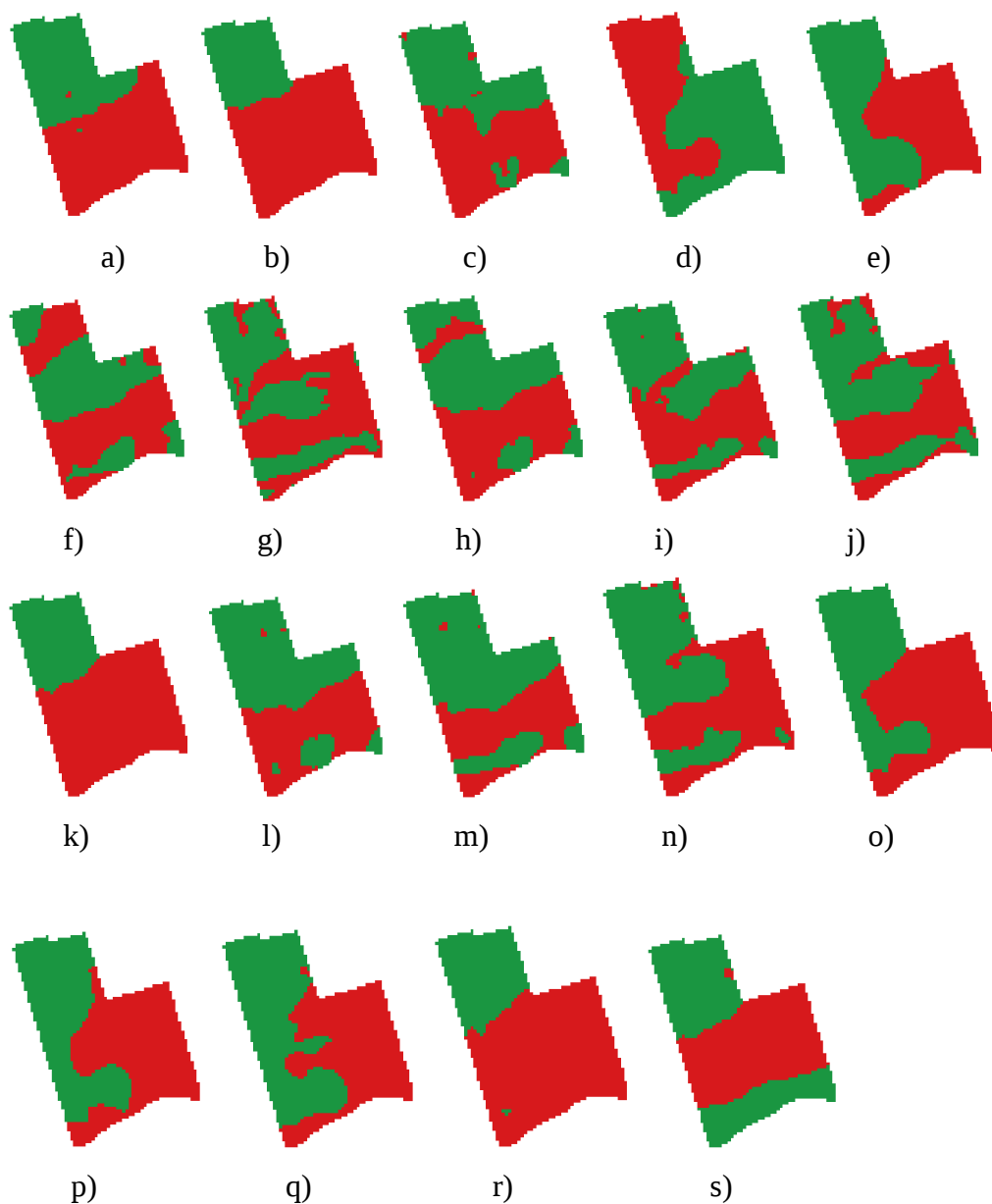


Figura 5. Mapas das zonas de manejo geradas. a) Produtividade; b) Potássio (K); c) Condutividade elétrica aparente do solo (CEa) a um metro de profundidade (CE100); d) Areia total (AT); e) Argila; f) CEa a 0,20 m de profundidade (CE20); g) NDVI; h) CE20 e CE100; i) NDVI e CE100; j) NDVI, CE20; k) AT, CE20, K; l) AT, CE20, CE100; m) NDVI, CE20, CE100; n) AT, CE20, NDVI; o) AT, argila, K; p) AT, argila, CE100; q) AT, argila, NDVI; r) AT, argila, NDVI, K, CE20, CE100; s) Todas as variáveis da Tabela 1, exceto a produtividade.

Na Tabela 2 estão apresentados os coeficientes de concordância Kappa entre as ZM definidas na Figura 5 em relação à ZM definida com a produtividade (Figura 5.a).

Tabela 2. Coeficientes de concordância Kappa entre os mapas das zonas de manejo, definidas pelas variáveis selecionadas com VIP (*Variable Importance on Projection*) maior que um e combinação entre elas, em relação ao mapa de zonas de manejo definida pela produtividade.

Variáveis utilizadas para definir zonas de		
manejo	Número de variáveis	Kappa
K	1	0,74 ^A
CE100	1	0,63 ^D
Areia total	1	0,48 ^F
Argila	1	0,37 ^H
CE20	1	0,33 ^I
NDVI	1	0,32 ^I
CE20 e CE100 (C1)	2	0,56 ^E
NDVI e CE100 (C2)	2	0,51 ^F
NDVI, CE20 (C3)	2	0,43 ^G
Areia total, CE20 e potássio (C4)	3	0,76 ^A
Areia total, CE20 e CE100 (C5)	3	0,67 ^C
NDVI, CE20 e CE100 (C6)	3	0,55 ^E
Areia total, CE20 e NDVI (C7)	3	0,55 ^E
Areia total, argila e K ¹ (C8)	3	0,53 ^E
Areia total, argila e CE100 (C9)	3	0,45 ^G
Areia total, argila e NDVI ² (C10)	3	0,39 ^H
Areia total, argila, NDVI, CE20 ³ , K, CE100 ⁴ (C11)	6	0,71 ^B
Variáveis sem seleção PLS-DA ⁵ (C12)	Todas	0,38 ^H

*Legenda: ¹/Potássio; ²/Índice de Vegetação da Diferença Normalizada; ³/Condutividade elétrica aparente do solo (CEa) a 0,20 m de profundidade; ⁴/ CEa a 1,00 m de profundidade; ⁵/ todos os atributos das amostras antes da seleção pelo PLS-DA: pH, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, acidez trocável, acidez potencial, soma de bases, CTC a pH 7,0, CTC efetiva, saturação por bases, saturação por alumínio, matéria orgânica, fósforo remanescente, enxofre, areia total, areia grossa, areia fina, silte, argila, CEa a 0,20 m, CEa a 0,50 m, CEa a um m, CEa a dois m.

**Valores Kappa com letras diferentes na mesma coluna diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Z.

Dentre as ZMs geradas com cada variável separadamente, aquelas definidas com base no K e na CEa a um metro de profundidade (CE100), apresentaram melhor concordância com a ZM da produtividade. A ZM do K apresentou o maior coeficiente Kappa de 0,74, ao passo que a ZM da CE100 obteve o valor de 0,63, sendo as duas diferentes estatisticamente a 5% de probabilidade pela estatística Z. O K é o segundo nutriente mais requerido pela soja após o nitrogênio (Embrapa, 2011),

apresentando na área boa correlação com a produtividade, estando classificado o teor do nutriente na área como médio (Bronch & Ranno, 2008). A ZM da CE100 apresentou o melhor resultado de concordância com a produtividade do que as demais ZMs geradas com base nos dados obtidos pelos sensores utilizados (LandMapper, NDVI e camadas do perfil do solo a 0,50 e 2,00 m do ARP®). Isso pode ser explicado pela maior contribuição da lixiviação de íons, como o K, em camadas inferiores, conforme verificado por Oliveira et al. (2012).

As demais ZMs geradas por uma variável, não apresentaram classificações tão boas quanto às ZMs geradas com o K e a CE100. Entretanto, observa-se que a ZM gerada pela AT apresentou maior concordância com a produtividade, classificada como boa, do que aquelas ZMs geradas pelas variáveis argila, CE20 e NDVI, que apresentaram concordância razoável com o mapa de produtividade. Essa superioridade da AT sobre a argila, CE20 e NDVI pode ser explicada pela baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, possuindo maior concordância com as áreas de baixa produtividade da área.

Para as ZMs definidas a partir da combinação de duas variáveis, todas apresentaram concordância classificada como boa com a produtividade. Entretanto, a combinação que mostrou o melhor resultado foi a combinação entre a CE20 e a CE100 (C1), uma vez que possuiu o maior coeficiente Kappa, sendo estatisticamente diferente das demais combinações com duas variáveis (Tabela 2).

Dentre as ZMs definidas com base em três variáveis, aquelas geradas pela combinação entre as variáveis AT, CE20 e K (C4), e entre as variáveis AT, CE20 e CE100 (C5), apresentaram maiores concordâncias com a ZM da produtividade (Tabela 2). Em ambos os casos o coeficiente Kappa foi classificado como “muito bom”. Ainda, a combinação C4 (Kappa = 0,76) foi melhor que a combinação C5 (Kappa = 0,67), que além de obter maior coeficiente Kappa, foi estatisticamente diferente, o que justificaria a sua escolha, perante a melhor concordância, em relação a combinação C5. Entretanto, perante a operacionalidade, a combinação C5 é a mais viável, por permitir uma interpretação mais rápida e barata por meio das CE20 e CE100, juntamente com a AT que possui baixa variabilidade temporal, sendo uma variável em potencial para delimitar zonas de manejo (Bottega et al., 2017). A variável da combinação C4 que ratifica a maior viabilidade da combinação C5 é o K, pois neste caso a amostra necessita ser analisada em laboratório para a obtenção dos dados.

Entre as demais ZMs geradas pela combinação de três variáveis, aquela que utilizou as variáveis NDVI, CE20 e CE100 (C6), apresenta-se como uma outra opção viável para o estudo da variabilidade espacial da produtividade na área. Além da boa concordância com a ZM da produtividade, os dados para a geração de ZM da combinação C6 possui a vantagem de serem obtidos por sensores, o que permite rápida aquisição e interpretação dos dados coletados (Tabela 2). Conforme mencionado por Corwin e Lesch (2003), a CEa vem sendo bastante utilizada por ser confiável e de fácil obtenção. Uma vez que se possui as imagens da área, o NDVI pode ser gerado rapidamente, otimizando o processo da delimitação das ZMs. Ainda, é possível utilizar o NDVI de maneira gratuita, obtendo as imagens a serem trabalhadas através de órgãos governamentais, como a Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A delimitação da ZM gerada pela combinação (C11) entre a AT, argila, NDVI, CE20, K e CE100, apresentou concordância muito boa com a produtividade, cujo coeficiente Kappa foi de 0,71, sendo o melhor coeficiente encontrado após aquele apresentado pelo K (Kappa = 0,74). Esta combinação contém todas as variáveis que foram selecionadas por meio da análise com o PLS-DA, sendo uma estratégia eficiente para explicar a variabilidade espacial da produtividade (Santi et al., 2012). Entretanto, como a de AP propõem o gerenciamento da lavoura visando a otimização das práticas agrícolas, percebe-se a que a definição da ZM somente pela CE100 se mostra mais adequada aos conceitos da AP do que a combinação C11.

A ZM gerada pela combinação de todas as variáveis do estudo (C12) apresentou um índice Kappa igual a 0,38, sendo sua concordância com a ZM da produtividade considerada razoável. Comparando-se o índice Kappa obtido com a ZM da combinação C12 e aquele obtido pela ZM da combinação C11, observa-se que a seleção das variáveis proporcionou a obtenção de um mapa (ZM de C11) mais correlacionado com o mapa da produtividade. Dessa maneira, nota-se que a seleção das variáveis é um processo importante para melhoria não apenas para a redução dos custos de medição e amostragem, mas também para a delimitação das ZMs mais correlacionadas com a produtividade (Andersen e Bro, 2010).

Para fins de adoção da técnica da AP para selecionar e dividir a área em ZMs confiáveis na relação com a produtividade, a ZM com duas classes se mostrou eficiente, onde a combinação da AT, CE20 e K, mostrou-se a melhor por resultar em melhor concordância. Entretanto, o uso prático da AP consta em gerenciar a área e

levantar informações de maneira mais rápida e menos onerosa, representando a real situação da área de interesse a partir da coleta de dados com sensores. Neste caso, a utilização do K não é a melhor opção para adotar a prática da AP, visto que não há um método de avaliação direta deste nutriente sem à prática convencional de amostragem do solo.

Sendo assim, a combinação entre areia AT, CE20 e CE100 torna-se mais viável, por ser composta por sensores que possibilitam respostas rápidas, além disso a variável AT é um atributo do solo que varia pouco no tempo (Reinert e Reichert, 2006). No entanto, apenas a leitura da CEa por meio da utilização do ARP® a um m de profundidade, mostrou-se melhor por ter apresentado, por si só, concordância muito boa com a produtividade, não sendo necessário utilizar uma combinação com outros atributos levantados para delimitar as ZMs relacionadas com a produtividade. Este resultado corrobora com o observado por Oliveira, Franchini e Debiasi (2011), que confirmaram a utilização da CEa para definir ZMs em correlação com a produtividade de soja.

A leitura da CEa na camada a um metro de profundidade (CE100) foi a melhor variável estudada, do ponto de vista operacional, relacionada com a produtividade. Consequentemente, a CE100 foi a melhor em se tratando de economia e agilidade no levantamento de dados para delimitar ZMs com base na variabilidade da produtividade. Resultado semelhante foi encontrado por Alves et al. (2013), que concluiu que a CEa pode ser utilizada, uma vez que respeita a variabilidade das propriedades do solo.

A variável do solo que melhor correlacionou com a produtividade foi o teor de K. Entretanto, mesmo estando bem correlacionado com a produtividade, o uso do potássio para delimitar zonas de manejo não se apresenta tão viável quanto a CE100. A baixa viabilidade se dá pelo custo e tempo demandado para a obtenção dos resultados, pois a análise do K é realizada por meio de análise laboratorial de rotina.

3.4. CONCLUSÕES

As melhores variáveis selecionadas para delimitar as zonas de manejo foram a areia total, argila, potássio, NDVI, condutividade elétrica aparente do solo à 0,20 m e a condutividade elétrica aparente do solo à um metro de profundidade.

As zonas de manejo geradas pelas variáveis selecionadas apresentaram maior concordância com a zona de manejo da produtividade, comparativamente às zonas de manejo gerada com todas as variáveis estudadas.

A zona de manejo que apresentou maior concordância com a produtividade foi aquela definida pelas variáveis areia total, condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 metros e potássio.

As zonas de manejo geradas pela condutividade elétrica aparente do solo a um metro de profundidade é a mais indicada, por apresentar bons resultados e maior viabilidade operacional.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, S. M., Alcântara, G. R., Reis, E. F., Queiroz, D. M., & Valente, D. S. M. (2013). Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. *Bioscience Journal, Uberlândia*, 29(1), 104-114.
- Andersen, C. M., & Bro, R. (2010). Variable selection in regression—a tutorial. *Journal of Chemometrics*, 24(11-12), 728-737.
- Araújo, G. K. D., Rocha, J. V., & Lamparelli, R. A. C. (2011). Relação entre NDVI da cultura da soja e dados de precipitação de estações meteorológicas e do modelo ECMWF, no estado do Paraná.
- Ballabio, D., & Consonni, V. (2013). Classification tools in chemistry. Part 1: linear models. PLS-DA. *Analytical Methods*, 5(16), 3790-3798.
- Behera, S. K., Mathur, R. K., Shukla, A. K., Suresh, K., & Prakash, C. (2018). Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. *CATENA*, 165, 251-259.
- Bottega, E. L., de Queiroz, D. M., de Assis de Carvalho Pinto, F., de Souza, C. M. A., & Valente, D. S. M. (2017). Precision agriculture applied to soybean: Part I- Delineation of management zones. *Australian Journal of Crop Science*, 11(5), 573.
- Broch, D. L., Pavinato, P. S., Possentti, J. C., Martin, T. N., & Del Quiqui, E. M. (2011). Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. *Revista Ciência Agronômica*, 42(3), 791-796.
- Carneiro, J. S. S., Faria, Á. J. G., Fidelis, R. R., Silva Neto, S. P., Santos, A. C., & Silva, R. R. (2017). Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no Cerrado. *Scientia Agraria*, 17(3), 38-49.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 37(1), 35-46.
- Congalton, R. G., & Mead, R. A. (1986). A review of three discrete multivariate analysis techniques used in assessing the accuracy of remotely sensed data from error matrices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (1), 169-174.
- Corwin, D. L., Lesch, S. M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture. *Agronomy journal*, 95(3), 455-471.
- Diacono, M., Castrignanò, A., Vitti, C., Stellacci, A. M., Marino, L., Coccozza, C., & Ventrella, D. (2014). An approach for assessing the effects of site-specific fertilization on crop growth and yield of durum wheat in organic agriculture. *Precision agriculture*, 15(5), 479-498.
- Fageria, N. K., & Stone, L. F. (1999). Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil. *Embrapa Arroz e Feijão-Docmentos (INFOTECA-E)*.

Freitas, M. D. C. M. D. (2011). A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. *Enciclopédia Biosfera*, 7(12).

Heim, R. H. J., Jürgens, N., Große-Stoltenberg, A., & Oldeland, J. (2015). The effect of epidermal structures on leaf spectral signatures of ice plants (Aizoaceae). *Remote Sensing*, 7(12), 16901-16914.

Klein, C., & Klein, V. A. (2015). Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. *Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)*, 19(1), 21-29.

Köppen, W., & Geiger, R. (1928). *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. *Wall-map 150cmx200cm*.

Korndörfer, G. H. *Correção do solo e adubação da soja nos cerrados*. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 159-174.

Martins, O. C. (2008). Construção da Fertilidade do Solo em Solos Arenosos. Simpósio discute como utilizar insumos e recursos para otimizar a produtividade do milho, 21-23.

McKinion, J. M., Willers, J. L., & Jenkins, J. N. (2010). Spatial analyses to evaluate multi-crop yield stability for a field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(1), 187-198.

Mehmood, T., Liland, K. H., Snipen, L., & Sæbø, S. (2012). A review of variable selection methods in partial least squares regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 118, 62-69.

Melo, B. M. R., Paglis, C. M., Oliveira, M. S., Teixeira, M. B. R., Silva, J. S. M., & Lima, D. F. F. (2017). Zonas de manejo em função de propriedades de solo, relevo e produtividade da lavoura cafeeira. *Revista Agrogeoambiental*, 9(2).

Moghadas, D., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Triantafilis, J. (2016). Probabilistic inversion of EM38 data for 3D soil mapping in central Iran. *Geoderma Regional*, 7(2), 230-238.

MOLIN, J. P. (2002). Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. *Engenharia Agrícola*, 22(1), 83-92.

Moral, F. J., Terrón, J. M., & Silva, J. M. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 335-343.

Nascimento Santos, J., & Pereira, E. D. (2013). Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. *Cadernos de Pesquisa*.

Nascimento, P. S., Silva, J. A., Costa, B. R. S., & Bassoi, L. H. (2014). Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(4).

Oliveira, F. A.; Franchini, J. C.; Debiasi, H. Variabilidade espacial da produtividade da soja e da condutividade elétrica de um Latossolo Bruno. In: Inamasu, R. Y.; Naime, J. M.; Resende, A. V.; Bassoi, L. H.; Bernardi, A. C. C. (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2011. p. 153-156.

Oliveira, R. C., Coelho, E. F., Araújo, R. T. M., Teixeira, J. D. C., Barros, D. L., Silva, A. C. P., & Amorim, M. D. S. Condutividade elétrica de um solo manejado com diferentes lâminas de irrigação e diferentes doses de potássio. In *Embrapa Mandioca e Fruticultura-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 30.; Reunião Brasileira sobre Micorrizas, 14.; Simpósio Brasileiro Microbiologia do Solo, 09.; Simpósio sobre Selênio no Brasil, 1., 2012, Maceió. *Fertbio 2012: "A responsabilidade socioambiental da pesquisa agrícola": [anais...]*. Maceió: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, 2012. 1 CR-ROM..

Osório Filho, B. D., dos Santos Rheinheimer, D., da Silva, L. S., Kaminski, J., & Dias, G. F. (2007). Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviais e respostas de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 37(3), 712-719.

Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2006). Propriedades físicas do solo. *Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria*.

Ruiz, H. A. (2005). Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo* (Vol. 30).

Ruiz, H. A. (2005). Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte+ argila). *Bras. Ci. Solo*, 29(2), 297-300.

Safanelli, J. L., Boesing, B. F. B., & Bottega, E. L. Estabelecimento de zonas de manejo a partir da resposta espectral do solo relacionada ao teor de matéria orgânica.

Santi, A. L., Amado, T. J. C., Cherubin, M. R., Martin, T. N., Pires, J. L., Della Flora, L. P., & Basso, C. J. (2012). Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(9), 1346-1357.

Sangoi, L., SILVA, P. D., Argenta, G., & Rambo, L. (2007). Desenvolvimento e exigências climáticas da planta de milho para altos rendimentos. *Lages: Graphel*, 1, 95.

Santos, F. C. D., Ferreira Novais, R., Lima Neves, J. C., Foloni, J. M., Albuquerque Filho, M. R. D., & Ker, J. C. (2008). Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(5).

Solos, E. (1997). Manual de métodos de análise de solo. *Rio de Janeiro: Embrapa Solos*.

SENGIK, E. S. 2010. Os macronutrientes e os micronutrientes das plantas. Disponível em: <http://www.dzo.uem.br/disciplinas/Solos/nutrientes.doc/>. Acessado em 27 de novembro de 2010.

Soja, E. (2011). Tecnologias de produção de soja—região central do Brasil 2012 e 2013. *Embrapa Soja, Londrina*.

Sousa, D. D., & LOBATO, E. (2004). Cerrado: correção do solo e adubação. *Planaltina: Embrapa Cerrados*.

Tiecher, T., Rheinheimer dos Santos, D., Alvarez Rasche, J. W., Brunetto, G., Kochem Mallmann, F. J., & Piccin, R. (2012). Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. *Bragantia*, 71(4).

Tripathi, R., Nayak, A. K., Shahid, M., Lal, B., Gautam, P., Raja, R., ... & Sahoo, R. N. (2015). Delineation of soil management zones for a rice cultivated area in eastern India using fuzzy clustering. *Catena*, 133, 128-136.

Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. D., Pinto, F. D. A. D. C., Santos, N. T., & Santos, F. L. (2012). Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. *Scientia Agricola*, 69(3), 173-179.

Vettorazzi, C. A., & Ferraz, S. F. D. B. (2000). Silvicultura de precisão: uma nova perspectiva para o gerenciamento de atividades florestais. *Agricultura de precisão. Viçosa: Ed. Da UFV*, 65-75.

Wold, S., Sjöström, M., & Eriksson, L. (2001). PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 58(2), 109-130.

Yang, X., Tang, J., Mustard, J. F., Wu, J., Zhao, K., Serbin, S., & Lee, J. E. (2016). Seasonal variability of multiple leaf traits captured by leaf spectroscopy at two temperate deciduous forests. *Remote Sensing of Environment*, 179, 1-12.

4. CAPÍTULO 2

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ZONAS DE MANEJO DEFINIDAS POR MEIO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO

Resumo: Os atributos físicos do solo estão diretamente relacionados com o potencial produtivo da área. Consequentemente, conhecer a variabilidade espacial (VE) destes atributos, pode possibilitar melhor o uso dos fertilizantes aplicados na área. No entanto, a análise da VE dos atributos físicos é dispendiosa. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo analisar as diferenças entre os atributos físicos do solo em zonas de manejo (ZMs) definidas pela condutividade elétrica aparente do solo (CEa) em três diferentes profundidades em solo de textura franco-argilo-arenosa no oeste da Bahia. Os dados foram coletados no oeste do estado da Bahia, em uma área de 204 ha de uma fazenda de soja, no município de São Desidério. Para definir as ZMs foram utilizados dados da CEa utilizando-se o equipamento *Automatic Resistivity Profiling* (ARP[®]) nas profundidades de 0,50, 1,00 e 2,00 metros. Os atributos físicos do solo nas ZMs definidas pela CEa tiveram suas médias comparadas. Não houve diferença significativa nas médias dos atributos físicos do solo entre as ZMs. Concluiu-se que, neste estudo, as ZMs definidas não foram capazes de identificar diferenças entre os atributos físicos do solo. Esse estudo sugere que para esse tipo de solo, provavelmente, a condutividade elétrica não apresenta grande variação em função dos atributos físicos do solo.

CHAPTER 2

SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES IN MANAGEMENT ZONES DEFINED BY SOIL APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY

Abstract: The physical attributes of the soil are related to the productive potential of the area. Consequently, knowing the spatial variability (SV) of the attributes may allow the use of fertilizers in the area. However, an SV analysis of the physical attributes is costly. Thus, this work had its objective as a difference between the physical attributes of the soil in management areas (ZMs) was created by the apparent electrical conductivity of the soil (CEa) in three versions depths in soil of sandy loamy-sandy texture in the west from Bahia. The data were collected in the western state of Bahia, in an area of 204 hectares of a soy farm, in the municipality of São Desidério. For the ZMs, CEa data were used using the Automatic Resistivity Profile (ARP®) at depths of 0.50, 1.00 and 2.00 meters. The physical soil attributes in the ZMs are programmed from now on. The means of the domains are physical soil between the ZMs. It was concluded, in this study, how the databases were not able to identify differences between the physical attributes of the soil. This study proposes that this type of soil probably does not have a great variety in the function of the physical attributes of the soil.

4.1. INTRODUÇÃO

Dentre o sistema trifásico do solo, a física do solo é a responsável por fornecer suporte à planta, mantendo a resistência e poder de resiliência contra as ações de manejo do solo, promovendo um ambiente propício ao desenvolvimento das plantas (Reichert et al., 2003). Dessa forma, torna-se relevante conhecer e manejar os atributos físicos do solo, contribuindo para que se alcance elevada produção das lavouras (Hauschild, 2013). Logo, é de suma importância avaliar o comportamento da física do solo, tornando-se prudente um monitoramento das práticas agrícolas decorrentes.

O monitoramento da produção agrícola vem sendo otimizado por meio da agricultura de precisão (AP). A AP busca reduzir os custos de produção e aumentar a produtividade e/ou qualidade das culturas (Far e Rezaei-Moghaddam, 2017). O uso da AP possibilita identificar a variabilidade espacial da produtividade e/ou qualidade da cultura em função de variáveis obtidas no campo (Matias et al., 2015). Rad et al (2015) acrescentam que a AP é uma alternativa que permite possibilitar garantia de produtividade, aliado à menor agressão ambiental e preservação dos recursos naturais. Partindo dessa premissa, pode-se definir a AP como um pacote tecnológico que gerencia a variabilidade, espacial e temporal, das lavouras (Fountas, Pedersen e Blackmore, 2005).

Uma vez a propriedade agrícola possuindo talhões com características semelhantes, suas variabilidades podem ser identificadas por meio de zonas de manejo (ZMs). Conceitualmente as ZMs são subáreas de uma propriedade que apresentam comportamentos inerentes quantos às condições de disponibilidade de nutrientes e tipo de solo, topografia e água (Bullock et al., 2009). As ZMs podem ser definidas por mapas de fertilidade do solo gerados por amostragem sistemática, mapas de produtividade temporais e modelos digitais de elevação (Valente et al, 2012). Outros modos de definir ZMs envolvem o uso da matéria orgânica do solo e da condutividade elétrica aparente do solo (Alves et al., 2013). A definição em ZMs das áreas agrícolas permite conhecer a distribuição espacial dos fatores envolvidos na produção, contribuindo para a otimização do uso dos insumos utilizados (Jesus Santos et al., 2015).

Uma das variáveis utilizadas pela AP para dividir a lavoura em ZM é por meio da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), que representa a capacidade

do solo de conduzir corrente elétrica (Kitchen, 1996). A praticidade e rapidez na coleta de dados por meio da CEa vem aumentando seu uso, uma vez que consegue identificar a variabilidade espacial das propriedades físico-químicas do solo (Córdoba et al., 2016). Sendo assim, a CEa é expressa em função das características físicas e químicas do solo, que podem estar influenciando na produtividade da lavoura (Peralta et al., 2013).

Fatores físico-químicos do solo como a argila, umidade e solução do solo estão diretamente ligados à CEa (Kaffka et al., 2005). Araújo et al. (2017) encontraram relação do potássio e capacidade de troca catiônica com a CEa ao definirem ZMs em área de Latossolo Vermelho Amarelo. Alamry et al. (2017) confirmaram a utilidade do princípio da condutividade elétrica do solo para identificar ZMs da umidade do solo por meio da CEa. A CEa é utilizada por responder à variabilidade da qualidade química dos solos, de forma a expressar a distribuição dos nutrientes da área pela atividade iônica da solução do solo (Sana et al., 2014). Ainda, os usos da CEa estão em estimar informações quanto à física do solo, como por exemplo, a partir de múltiplos sensores para avaliar a densidade, umidade e textura dos solos (Cho, Sudduth e Chung, 2016). Sanches et al. (2018) constatarem a relação da argila com a CEa ao estudarem o potencial desta para descrever o pH em solo argiloso.

Ratificando a importância da física do solo, Burak, Santos e Passos (2017) constatarem a capacidade de retenção de água do solo da argila influenciando na produtividade de café Conilon. Logo, a física do solo também atua sobre a disponibilidade de nutrientes, uma vez que a absorção de água e nutrientes se dá na zona radicular, necessitando de um ambiente adequado para seu desenvolvimento (Reichert, Suzuki e Passos, 2007). Dessa forma, um solo que apresenta boa aeração, água disponível e baixa resistência ao desenvolvimento das raízes, torna-se um solo com boa qualidade física (Tormena et al, 2017).

Devido a relação existente entre a CEa e os atributos físicos do solo em outros tipos de solos, este trabalho teve como objetivo analisar os atributos físicos do solo entre as ZMs definidas pela CEa em três diferentes profundidades em solo de textura franco-argilo-arenosa no oeste da Bahia.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em um talhão da Fazenda São Jorge com área de 204 hectares cultivada com soja sob o sistema de plantio direto, localizada no oeste da Bahia no município de São Desidério. O cultivo ocupa uma área em que apresentava vegetação de cerrado anteriormente, sendo iniciado a atividade agrícola com o cultivo da soja há quatro anos atrás.

O tipo de solo da área é classificado como Latossolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa (Embrapa, 2013). De acordo com Köppen (1928) o clima da região é caracterizado do tipo Aw tropical úmido, apresentando relevo plano com altitude média de 493 metros.

Para avaliar os atributos físicos do solo dentro de cada zona de manejo (ZM) definida pela CEa, foram coletadas amostras de solo em grade amostral para análise granulométrica na camada de 0,20 m de profundidade do perfil do solo. Também foram coletadas, aleatoriamente, amostras de solo indeformadas dentro das ZMs definidas, nas camadas de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.

A partir da planta planimétrica da propriedade foram definidos os pontos de amostragem de solo, totalizando 204 pontos, respeitando a grade amostral de um ponto por hectare. Para a locação dos pontos da área foi utilizado um GPS Portátil, marca Garmin, modelo Etrex® 30x, fazendo-se uso de um trado de caneca para a retirada das amostras. Sendo assim, para a análise granulométrica cada ponto amostral foi representado por oito amostras simples no raio de 10 m de cada ponto definido da grade amostral, coletadas na camada de 0 a 0,20 m de profundidade.

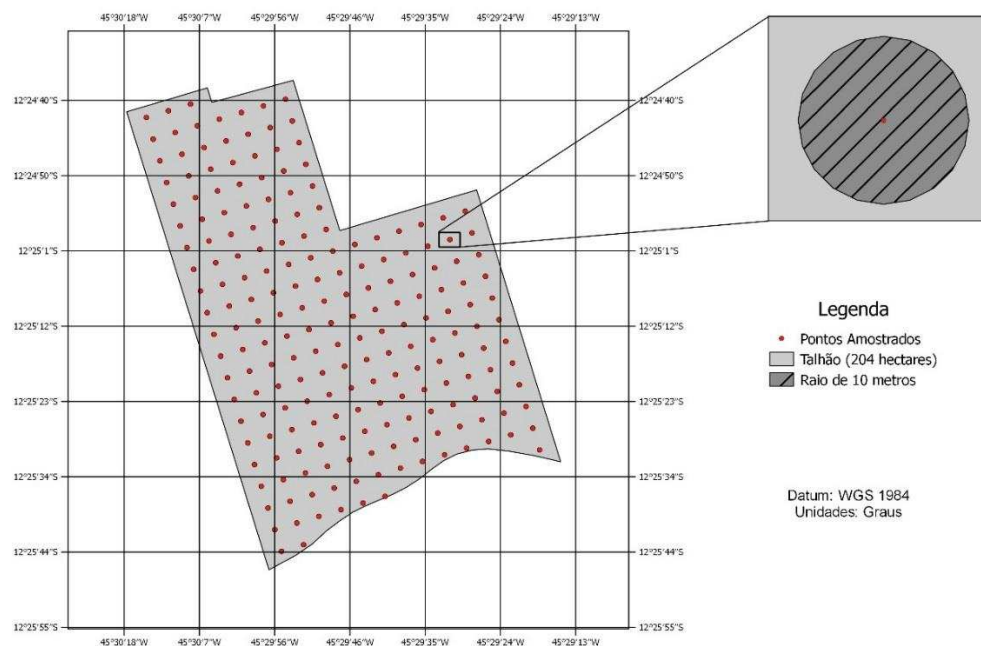


Figura 1. Planejamento da grade de amostragem de solo, apresentando os 204 pontos coletados, para a análise granulométrica.

As zonas de manejo foram definidas após a leitura da CEa da área, sendo esta determinada pelo equipamento ARP® (*Automatic Resistivity Profiling*), cuja a tecnologia possui patente pertencente à empresa Geocarta. O equipamento opera tracionado pela barra de tração do trator e utiliza o método da resistividade elétrica para realizar a leitura da CEa. Uma vez em contato com o solo por meio dos eletrodos (discos), o ARP® faz a leitura da mensuração da CEa, sendo formado por um chassi composto por 4 eixos, sendo o primeiro (da esquerda para a direita – Figura 2) o emissor da corrente elétrica e os demais eixos receptores da corrente realizando a leitura da diferença de potencial (DDP). O ARP® realiza a leitura da CEa em três profundidades, 0,50, 1,00 e 2,00 metros de profundidade, correspondendo, respectivamente, às distancias dos demais eixos leitores da DDP em relação ao primeiro eixo emissor.



Figura 2. Equipamento ARP[®] de mensuração da condutividade elétrica aparente do solo nas profundidades de 0,50, 1,00 e 2,00 metros.

A medição da CEa se deu em linhas espaçadas de 14 m, ocorrendo o registro contínuo da CEa a cada 0,10 m nas três profundidades, totalizando 489.410 pontos coletados em toda a área de estudo, estando cada ponto de leitura da CEa georreferenciado. O conjunto trator-ARP[®] obteve a capacidade operacional de leitura da CEa de 12,75 ha h⁻¹, operando à velocidade de 14 km h⁻¹. A operação de leitura da CEa ocorreu nos dias 27 e 28 de outubro de 2016.

Após a leitura da CEa com o ARP[®] a área do trabalho foi dividida em três ZMs utilizando o software Quantum GIS (QGIS), versão 2.16.3, programa livre licenciado pela GNU General Public License. Ainda, foram definidos por meio do QGIS, aleatoriamente em toda a área de estudo, 25 pontos para a retirada de amostras indeformadas nas camadas de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do perfil do solo. Das amostras indeformadas foram retiradas informações quanto a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo. Essa amostragem foi realizada dessa forma devido ao dispêndio e tempo de aquisição das amostras.

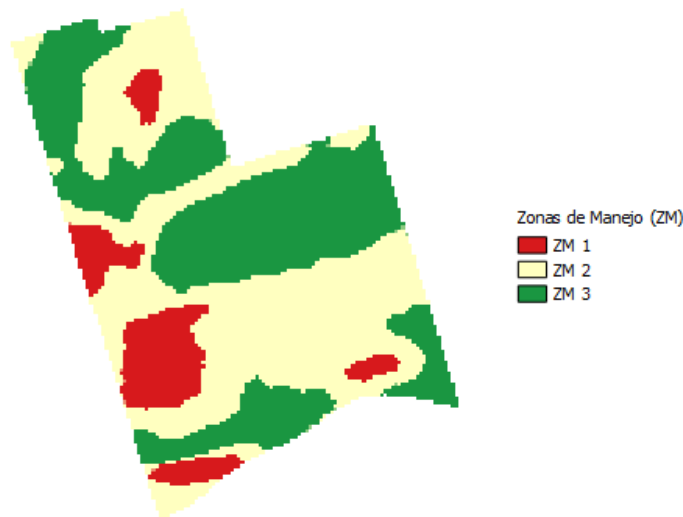


Figura 3. Delimitação das zonas de manejo por meio da condutividade elétrica aparente do solo utilizando o equipamento ARP[®].

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. A análise granulométrica foi realizada a partir do método proposto por Ruiz (2005a, b). A determinação da microporosidade do solo se deu em mesa de tensão a 60 cm de coluna de água, por 48 horas (Embrapa, 1997). A porosidade total foi determinada pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas. Para a macroporosidade foi realizado a diferença da porosidade total com a microporosidade.

O experimento foi conduzido em um esquema de fatorial 3 x 2, sendo 3 ZM e 2 profundidades, considerando um delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos à análise de correlação de Pearson entre a CEa e os atributos físicos do solo. Ainda, os dados foram analisados mediante análise de variância, e a comparação entre as médias dos tratamentos foi realizada através do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As zonas de manejo da área foram delimitadas pela condutividade elétrica aparente do solo mensurada pelo equipamento ARP®. Sendo assim, a Tabela 1 apresenta os valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre a CEa e todas as propriedades físicas do solo deste trabalho. A análise da tabela revela baixa ou ausência de correlação da CEa com as propriedades físicas estudadas, não sendo significativas. Heiniger et al. (2003) considera valores de correlação significativos acima de 0,70, os quais não foram observados neste trabalho.

Tabela 1. Coeficiente de correlação de Pearson entre a condutividade elétrica aparente do solo nas três profundidades estudadas e a média destas com os atributos físicos estudados.

Variável	Profundidade ¹	CE50 ²	CE100 ³	CE200 ⁴	Média da CE
Areia ⁵	0-0,20 ^{1a}	0,069	-0,151	-0,101	-0,031
Silte ⁵	0-0,20	-0,057	0,274	0,204	0,096
Argila ⁵	0-0,20	-0,065	0,08	0,045	0,000
Ds ⁶	0-0,20	-0,120	-0,043	-0,005	-0,078
	0,20-0,40 ^{1b}	0,161	-0,173	-0,015	0,033
MIP ⁷	0-0,20	0,096	0,317	0,190	0,188
	0,20-0,40	0,245	0,165	0,262	0,235
MAP ⁸	0-0,20	0,013	-0,173	-0,116	-0,071
	0,20-0,40	-0,196	0,091	-0,062	-0,093
PT ⁹	0-0,20	0,120	0,043	0,005	0,078
	0,20-0,40	-0,161	0,173	0,015	-0,033

^{1/}Profundidade da camada do perfil do solo amostrado, sendo-as, na camada de 0 a 0,20 m (^{1a}), e de 0,20 a 0,40 m (^{1b}); ^{2/}Condutividade elétrica aparente do solo (CE) à 0,50 m de profundidade; ^{3/}CE à 1,00 m de profundidade; ^{4/}CE à 1,00 m de profundidade; ^{5/}Expresso em dag kg⁻¹; ^{6/}Ds, Densidade do solo (em g/cm³); ^{7/}MIP, microporosidade do solo (em g/cm³); ^{8/}MAP, macroporosidade do solo (em g/cm³); ^{9/}PT, Porosidade Total (em g/cm³).

A densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo são fatores físicos que compõem a estrutura do solo, que podem influenciar também nas medições da CEa (Bottega et al., 2015). Desse modo, para avaliar a relação dos atributos do solo entre as ZMs definidas pela CEa, foi realizado o teste de média submetidos à análise estatística a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Sendo assim a Tabela 2 apresenta a análise detalhada dos resultados da estatística descritiva

dos atributos físicos do solo e da condutividade elétrica aparente do solo nas camadas de 0,50, 1,00 e 2,00 m de profundidade.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo da área de estudo.

Variável	Prof. ¹	ZM 1		ZM 2		ZM 3	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Areia	0-0,20 ^{1a}	74,57 a	2,21	74,54 a	2,40	74,63 a	3,10
Silte	0-0,20	4,81 a	1,11	5,24 a	1,70	5,18 a	1,66
Argila	0-0,20	20,62 a	1,81	20,22 a	1,70	20,19 a	2,40
CE50 ²	0-0,50	1,12	0,36	1,48	0,47	1,91	0,49
CE100 ³	0-1,00	0,78	0,23	1,01	0,30	1,25	0,31
CE200 ⁴	0-2,00	0,44	0,15	0,56	0,17	0,71	0,18
Ds ⁵	0-0,20	1,57 aA	0,05	1,54 aA	0,09	1,53 aA	0,08
	0,20-0,40 ^{1b}	1,52 aA	0,05	1,55 aA	0,11	1,58 aA	0,08
MIP ⁶	0-0,20	25,41 aA	1,88	27,74 aA	2,30	27,79 aA	3,49
	0,20-0,40	24,73 aA	0,82	25,36 aB	1,11	25,46 aB	1,37
MAP ⁷	0-0,20	15,33 aA	3,68	14,03 aA	4,81	14,36 aA	5,23
	0,20-0,40	17,81 aA	1,87	16,20 aA	4,91	15,10 aA	4,27
PT ⁸	0-0,20	40,74 aA	1,95	41,77 aA	3,28	42,15 aA	2,96
	0,20-0,40	42,53 aA	2,02	41,56 aA	4,02	40,55 aA	2,95

^{1/}Prof., Profundidade da camada do perfil do solo amostrada de 0 a 0,20 m (^{1a}), e de 0,20 a 0,40 m (^{1b}); ^{2/}Condutividade elétrica aparente do solo (CE) à 0,50 m de profundidade; ^{3/}CE à 1,00 m de profundidade; ^{4/}CE à 2,00 m de profundidade; ^{5/}Ds, Densidade do solo; ^{6/}MIP, microporosidade do solo; ^{7/}MAP, macroporosidade do solo; ^{8/}PT, Porosidade Total. As médias seguidas pela mesma letra minúscula, entre a mesma variável entre as três zonas de manejo, e as médias seguidas pela mesma letra maiúscula na mesma zona de manejo entre a mesma variável, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Não houve diferença significativa entre a granulometria e a CEa entre as ZMs criadas. Percebe-se que o solo da área de estudo apresenta caráter arenoso, com médias de 74,58 dag kg⁻¹ de areia, 5,08 dag kg⁻¹ de silte e 20,34 dag kg⁻¹ de argila. A CEa apresentou baixos valores, corroborando com este comportamento em solos arenosos, uma vez que a areia é constituída por quartzo, considerado um isolante elétrico (Gimenez, 2013).

Os maiores valores de coeficiente de variação (CV) encontrados foram para CEa nas três camadas estudadas, e para a macroporosidade do solo em ambas as profundidades amostradas. Os altos valores do CV da CEa das três profundidades mensuradas do solo estudado, se mostraram semelhantes aos encontrados por Machado et al (2006). Este elevado CV da CEa é consequência da variação da distribuição dos atributos do solo da área. Esta afirmação se fundamenta na CEa responder a diferentes fatores edáficos, como a solução do solo, teor de argila e mineralogia, e temperatura e umidade do solo (McNeill, 1980a).

Os valores do CV da MAP concordaram com os obtidos por Neto, Oliveira e Pereira (2017) e Mazurana et al (2011). Essa variação da MAP pode ocorrer devido ao tipo de manejo do solo realizado influenciando, consequentemente, em sua dependência espacial (Schaffrath et al, 2008). Os valores médios de MAP, entretanto, se apresentaram contrários aos encontrados por Silva et al (2008), uma vez que a MAP no presente estudo aumentou à medida que a profundidade da camada de solo se aprofundava.

Para o parâmetro densidade do solo nos fatores ZM e profundidade do solo, quando analisados separadamente, não houve diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, sendo o mesmo observado para a interação entre os fatores. Logo, a densidade não diferiu significativamente entre as ZMs para as profundidades de 0-0,20 m (profundidade 1) e 0,20-0,40 m (profundidade 2).

Os valores de densidade do solo encontrados apresentaram valores normais de densidade para solos arenosos, segundo o intervalo de 1,2 a 1,9 g cm⁻³, definido por Reinert e Reichert (2006). A estrutura do solo não apresenta impedimentos ao crescimento das raízes, sendo explicado pelos baixos valores de densidade. Fato este confirmado pela densidade para as duas profundidades se mostrarem inferiores aos valores críticos, uma vez que os valores estão abaixo 1,70 g/cm³ (Reichert et al., 2003).

Diante os resultados encontrados no presente trabalho, não foram identificadas diferenças entre a densidade do solo entre as ZMs definidas pela CEa. Pelo fato da densidade do solo se relacionar com a CEa, a viabilidade do uso da primeira estaria em poder ser expressa pela CEa, por ser um método não destrutivo e de fácil utilização (Besson et al, 2004). Entretanto, perante os resultados encontrados, a viabilidade do uso da CEa neste estudo apresenta-se incoerente para obter respostas sobre o comportamento estrutural do solo entre as ZMs. Essa incoerência entra em conflito pelo fato da densidade do solo compor os fatores da estrutura edáfica (Fukue et al., 1999). No entanto, há o potencial do uso da CEa para conhecer a estrutura física do solo em outros tipos de solos (Molin e Rabello, 2011; Peralta e Costa, 2013; Montenegro e Montenegro, 2006; Machado et al, 2006; Heiniger et al, 2003).

As ZMs delimitadas pela CEa não apresentaram diferenças para a densidade e para a granulometria. Em se tratando da composição estrutural do solo, a CEa é mais sensível à densidade, sendo independente o teor da granulometria da área (Seladji et al., 2010). Contudo, para o presente estudo, as ZMs delimitadas pela CE não expressaram diferenças no comportamento da densidade do solo da área. Pelo o solo da área apresentar elevado teor de areia, há baixa resiliência estrutural ao manejo submetido (Bavoso et al., 2012), e consequentemente, pode explicar a homogeneidade da densidade na área do estudo.

Conforme evidenciado na Tabela 3, a macroporosidade não sofreu diferença estatística a 5% de probabilidade entre as ZMs pelo teste de Tukey. Resultados semelhantes foram encontrados por Mazurana et al. (2011), que também não encontraram diferença significativa para a macroporosidade em profundidade, em área sujeita ao plantio direto. No entanto, os valores da macroporosidade apresentaram tendência de aumento em profundidade dentre as ZMs, exceto para a ZM 3.

Os valores de macroporos se encontram na faixa ideal, entre 0,17 e 0,25 m³m⁻³, de acordo com Lima et al. (2007). A macroporosidade do solo, nas duas profundidades, apresentou valores maiores que o limite crítico de 10% (Tabela 3) de macroporos, não prejudicando o desenvolvimento radicular (STOLF et al., 2011). Dessa forma, ratifica-se o não impedimento da densidade no crescimento das raízes, pois à medida que a macroporosidade se eleva a densidade diminui.

Os macroporos são os responsáveis por criar um meio à movimentação química, da água e do ar (Luo, L., Lin, H., e Li, S., 2010), influenciando na resposta

da CEa. Segundo Molin e Rabello (2011), a CEa possui relação com os atributos físicos, o que abrange a estrutura do solo e, consequentemente, considera a macroporosidade como um dos fatores envolvidos. Ainda, estes últimos autores encontraram variações da CEa em solos com diferentes teores de argila, considerando suas propriedades de retenção de umidade e condução de eletricidade.

Mesmo a macroporosidade apresentando valores acima do limite crítico, nota-se neste trabalho menores índices de macroporos em relação aos microporos. Essa observação concorda com Tratch et al. (2017), que também verificou maiores valores da microporosidade em relação à macroporosidade em área de plantio direto. Entretanto, os valores presentes da microporosidade discordam de Miotti et al. (2013), que observaram médias de 21% e 15% de macroporos em solos arenoso e argiloso, respectivamente.

A microporosidade se mostrou ideal, com valores entre 0,25 e 0,33 m³ m⁻³ (Lima et al., 2007), havendo diferença significativa apenas entre as profundidades amostradas, não observando o mesmo entre as ZMs. Sendo assim, para a delimitação das ZMs por meio da CEa, a diferença observada da microporosidade entre as profundidades foi irrelevante.

Nota-se ainda que, a microporosidade foi maior na profundidade de 0 – 0,20 m, como se esperava, visto que a macroporosidade foi, predominantemente, menor nesta mesma camada (Tabela 3) e maior na camada de 0,20 – 0,40 m. Resultado contrário do presente trabalho foi verificado por Souza et al. (2017), relatando que a redução da microporosidade em profundidade foi devido a menor macroporosidade em resposta ao aumento da densidade.

A maior microporosidade observada na profundidade 0-0,20 m pode estar relacionada com o maior teor de argila na camada, estando esta hipótese embasada no fato da fração granulométrica argila determinar a proporção de microporos (Brady e Weil, 2002). A hipótese concorda com Burak, Santos e Passos (2017), que verificaram a relação da argila com a microporosidade, e concluíram que os aumento dos teores de argila levaram ao aumento da microporosidade.

A microporosidade é a fração da porosidade do solo responsável pela retenção de água (Jesus et al., 2017). Diante desse fato, como a CEa é afetada pela umidade do solo (Gingine, Dias, e Cardoso, 2016), a microporosidade seria a parte da estrutura do solo que garantiria a influência da umidade na leitura da CEa. Entretanto, nota-se que a delimitação das ZMs pela CEa não discriminou a

distribuição da microporosidade na área, uma vez que não foi verificado diferença estatística entre a microporosidade das ZMs delimitadas.

A porosidade total (PT), tanto entre as ZMs quanto entre as profundidades, não apresentou diferença significativa a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. A área do estudo não apresentou PT do solo ideal, segundo a faixa de 50 e 60% proposta por Baruqui (1983). Entretanto, a PT da área revelou um ambiente edáfico adequado para o desenvolvimento do sistema radicular, ratificado pelos valores encontrados de macroporosidade e microporosidade. Mesmo a PT sendo menor que a ideal, o solo possui elevada drenagem e infiltração, devido aos elevados teores de areia da área. Ao contrário do comportamento encontrado por Freitas et al. (2014), que caracterizou solos do oeste da Bahia, esta área apresentou a peculiaridade da predominância da microporosidade.

A PT do solo apresentou valores esperados visto o seu comportamento ser diretamente proporcional com a densidade, não sendo um fator limitante para a movimentação de água e ar no perfil do solo. Assim como a estrutura e o teor de água do solo, a porosidade é outro fator que influencia a CEa (Fukue, 1999). De acordo com Jackson et al. (1978) a porosidade de solos arenosos influencia a CEa quanto à disposição e formas das partículas da estrutura, assim como o fluido contido nos poros.

As ZMs delimitadas neste estudo pela CEa não revelou diferença entre os valores de PT na área. Isso leva à hipótese que os fatores que mais influenciaram na CEa, neste estudo, não foram os atributos físicos do solo, mas sim os químicos. Uma segunda hipótese está ligada à umidade do solo, que não sendo avaliada neste trabalho, revela-se como possível responsável pela criação de ZM, estando relacionada a outras características do solo, como a argila. Uma vez que o solo estudado é arenoso e possui baixa capacidade de retenção de água e íons, ocorre maior quantidade de nutrientes em solução (Silva, 2002), podendo ser o fator responsável pela delimitação das ZM.

Por fim, várias hipóteses podem ser questionadas em relação à influência dos atributos do solo na CEa, sejam eles físicos ou químicos. Visto que a CEa está diretamente relacionada à fase líquida por meio dos sólidos solúveis, na relação entre os íons e a argila, e pelas partículas que compõem a estrutura do solo (Valente, 2010). Logo, para trabalhos futuros, seria recomendável levantar demais informações dos atributos do solo, além dos estudados neste trabalho. Dessa forma, pode-se

conhecer os fatores que realmente influenciam na CEa, a fim de otimizar o uso das ZM, e consequentemente, conhecer os fatores que se diferenciam na área.

4.4. CONCLUSÕES

A condutividade elétrica aparente do solo delimitou a área em três zonas de manejo, entretanto, entre estas não houve diferença significativa para os atributos físicos do solo analisados, representados pela granulometria, densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alamry, A. S., van der Meijde, M., Noomen, M., Addink, E. A., van Benthem, R., & de Jong, S. M. (2017). Spatial and temporal monitoring of soil moisture using surface electrical resistivity tomography in Mediterranean soils. *CATENA*, 157, 388-396.
- Alves, S. M., Alcântara, G. R., Reis, E. F., Queiroz, D. M., & Valente, D. S. M. (2013). Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. *Bioscience Journal, Uberlândia*, 29(1), 104-114.
- Araújo Bavoso, M., Pires da Silva, A., Coutinho Figueiredo, G., Tormena, C. A., & Balarezo Giarola, N. F. (2012). Resiliência física de dois Latossolos Vermelhos sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(6).
- Araújo, E. G., Corrêa, A. R., Lima, D. C. D. O. S., de Pieri Prando, E., Sena, K. N., Montanari, R., & da Silva, R. M. (2017). Análise espacial da condutividade elétrica e atributos físico-químicos de um Latossolo. *Agrarian*, 9(31), 73-83.
- Baruqui, A. M. (1983). Comentários sobre a descrição e resultados analíticos de um perfil de solo. *Informe Agropecuário*, 9(105), 33-44.
- Besson, A., Cousin, I., Samouëlian, A., Boizard, H., & Richard, G. (2004). Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 239-249.
- Bottega, E. L., de Queiroz, D. M., Santos, N. T., de Carvalho Pinto, F. D. A., & de Souza, C. M. A. (2015). Correlation between apparent electrical conductivity and chemical and physical attributes of a Rhodic Hapludox. *Comunicata Scientiae*, 6(2), 134-142.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2002). Arquitetura e propriedades físicas do solo. *BRADY, NC; Weil, RR The Nature and Properties of Soils*, 13, 2-49.
- Bullock, D. S., Ruffo, M. L., Bullock, D. G., & Bollero, G. A. (2009). The value of variable rate technology: an information-theoretic approach. *American journal of agricultural economics*, 91(1), 209-223.
- Burak, D. L., Santos, D. A., & Passos, R. R. (2017). Variabilidade espacial de atributos físicos: relação com relevo, matéria orgânica e produtividade em café Conilon. *Coffee Science*, 11(4), 455-466.
- Cho, Y., Sudduth, K. A., & Chung, S. O. (2016). Soil physical property estimation from soil strength and apparent electrical conductivity sensor data. *Biosystems Engineering*, 152, 68-78.
- Córdoba, M. A., Bruno, C. I., Costa, J. L., Peralta, N. R., & Balzarini, M. G. (2016). Protocol for multivariate homogeneous zone delineation in precision agriculture. *biosystems engineering*, 143, 95-107.

Far, S. T., & Rezaei-Moghaddam, K. (2017). Impacts of the Precision Agricultural Technologies in Iran: An analysis Experts' perception & their determinants. *Information Processing in Agriculture*.

Fountas, S., Pedersen, S. M., & Blackmore, S. (2005). ICT in Precision Agriculture—diffusion of technology. *ICT in agriculture: perspective of technological innovation*, E. Gelb and A. Offer (eds), <http://departments.agri.huji.ac.il/economics/gelb-main.html>.

Freitas, P. L., Polidoro, J. C., Santos, H. G., Prado, R. B., Calderano, S. B., Gregoris, G., ... & Campos Bernardi, A. C. (2014). Identificação e caracterização físico-química de Latossolos de textura arenosa e média da região oeste da Bahia. *Cadernos de Geociências*, 11(1-2), 83-93.

Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., & Taya, N. (1999). As microestruturas de argila dadas por medidas de resistividade. *Geologia de engenharia*, 54 (1-2), 43-53.

Gimenez, L. M. (2013). *Relação da condutividade elétrica aparente com algumas propriedades físico-hídricas e com a variabilidade espacial dos solos* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Gingine, V., Dias, A. S., & Cardoso, R. (2016). Compaction Control of Clayey Soils Using Electrical Resistivity Charts. *Procedia Engineering*, 143, 803-810.

Heiniger, R. W., McBride, R. G., & Clay, D. E. (2003). Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. *Agronomy Journal*, 95(3), 508-519.

Hauschild, F. E. G. (2013). Técnicas de agricultura de precisão para definição de Zonas de manejo de solo. *Santa Maria-RS–UFSM*.

Jackson, P. D., Smith, D. T., & Stanford, P. N. (1978). Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands. *Geophysics*, 43(6), 1250-1268.

Jesus, M. C., dos Santos Brito, A., de Oliveira Silva, M., Teixeira, S. S., & de Carvalho, W. D. (2017). Permeabilidade ao ar e porosidade de solos na região semiárida. *Engineering in Agriculture*, 25(3), 230-239.

Jesus Santos, E. O., Pinto, F. B., de Almeida Barbosa, M., & Gontijo, I. (2015). Delineamento de zonas de manejo para macronutrientes em lavoura de café conilon consorciada com seringueira. *Coffee Science*, 10(3), 309-319.

Kaffka, S. R., Lesch, S. M., Bali, K. M., & Corwin, D. L. (2005). Site-specific management in salt-affected sugar beet fields using electromagnetic induction. *Computers and electronics in Agriculture*, 46(1), 329-350.

Köppen, W., & Geiger, R. (1928). *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. *Wall-map 150cmx200cm*.

Lima, C. G. D. R., Carvalho, M. D. P., Mello, L. M. M., & Lima, R. C. (2007). Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a

densidade do solo de Pereira Barreto (SP). *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 31(6).

Luo, L., Lin, H., & Li, S. (2010). Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. *Journal of Hydrology*, 393(1-2), 53-64.

Machado, P. D. A., Bernardi, A. D. C., Valencia, L. I. O., Molin, J. P., Gimenez, L. M., Silva, C. A., ... & Meirelles, M. S. P. (2006). Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Área de Informação da Sede-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.

Machado, P. D. A., Silva, C., Bernardi, A. D. C., Carmo, C. D. S., Valencia, L., Meirelles, M., & Gimezes, L. (2003). Técnicas de agricultura de precisão no diagnóstico de uma cultura de soja sob plantio direto em Carambeí, PR. *Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*.

Matias, S. S. R., Nóbrega, J. C. A., Nóbrega, R. S. A., Andrade, F. R., & Baptistel, A. C. (2015). Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. *Revista Agro@ mbiente On-line*, 9(1), 17-26.

Mazurana, M., Levien, R., Müller, J., & Conte, O. (2011). Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. *Revista brasileira de ciência do solo. Campinas. Vol. 35, n. 4 (jul./ago. 2011), p. 1197-1206*.

McNeill, J. D. (1980a). *Electrical conductivity of soils and rocks*. Geonics Limited.

Miotti, A. A., Costa, M. C. G., Ferreira, T. O., & Romero, R. E. (2013). Profundidade e atributos físicos do solo e seus impactos nas raízes de bananeiras. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35, 536-545.

Molin, J. P., & Rabello, L. M. (2011). Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. *Engenharia Agrícola*, 31(1), 90-101.

Montenegro, A. D. A., & Montenegro, S. M. G. L. (2006). Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(1), 30-37.

Neto, G. K., Oliveira, A. H., & Pereira, S. Y. (2017). Variabilidade Espacial de Atributos Físicos do Solo em uma Sub-Bacia às Margens do Rio Mogi Guaçu (SP). *Geociências (São Paulo)*, 36(2), 381-394.

Peralta, N. R. L., Costa, J., Balzarini, M., & Angelini, H. (2013). Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(2), 205-218.

Peralta, N. R., & Costa, J. L. (2013). Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 218-226.

Rad, C. R., Hancu, O., Takacs, I. A., & Olteanu, G. (2015). Smart monitoring of potato crop: a cyber-physical system architecture model in the field of precision agriculture. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 73-79.

Reichert, J. M., Reinert, D. J., & Braidia, J. A. (2003). Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb*, 27, 29-48.

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., & Reinert, D. J. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 5, 49-134.

Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2006). Propriedades físicas do solo. *Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria*.

Ruiz, H. A. (2005a). Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte+ argila). *Bras. Ci. Solo*, 29(2), 297-300.

Ruiz, H. A. (2005b). Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo* (Vol. 30).

Sana, R. S., Anghinoni, I., Brandão, Z. N., & Holzschuh, M. J. (2014). Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*. Vol. 18, n. 10 (out. 2014), p. 994-1002.

Sanches, G. M., Magalhães, P. S., Remacre, A. Z., & Franco, H. C. (2018). Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. *Soil and Tillage Research*, 175, 217-225.

Schaffrath, V. R., Tormena, C. A., Fidalski, J., & Andrade Gonçalves, A. C. (2008). Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(4).

Seladji, S., Cosenza, P., Tabbagh, A., Ranger, J., & Richard, G. (2010). The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. *European journal of soil science*, 61(6), 1043-1055.

Silva, F. D. F., Freddi, O. D. S., Centurion, J. F., Aratani, R. G., Andrioli, F. F., & Andrioli, I. (2008). Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. *Irriga*, 191-204.

Silva, Ê. F. D. F. (2002). *Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Solos, E. (1997). Manual de métodos de análise de solo. *Rio de Janeiro: Embrapa Solos*.

Solos, E. (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. *Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro*.

Souza, J. M., Bonomo, D. Z., & Pires, F. R. (2017). Índice S em solo subsolado da região dos Tabuleiros Costeiros, Espírito Santo. *MAGISTRA*, 27(1), 14-22.

Stolf, R., Thurler, Á. D. M., Bacchi, O. O. S., & Reichardt, K. (2011). Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(2), 447-459.

Tormena, CA, Karlen, DL, Logsdon, S. e Cherubin, MR (2017). A colheita e o cultivo da palha do milho têm impacto na qualidade física do solo próximo à superfície. *Soil and Tillage Research*, 166, 122-130.

Tratch, R., Serrat, B. M., Montans, T. B., & Júnior, A. R. P. (2017). Comparações Físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob Diferentes Períodos de Cultivo em Sistema de Plantio Direto. *Revista Acadêmica: Ciência Animal*, 4(1).

Valente, D. S. M. (2010). Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão.

Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. D., Pinto, F. D. A. D. C., Santos, N. T., & Santos, F. L. (2012). The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. *Revista Ciência Agronômica*, 43(4), 683-690.

5. CONCLUSÃO GERAL

O objetivo desse trabalho foi avaliar os atributos relacionados à produtividade para adoção da agricultura de precisão no cerrado em uma área cultivada com soja. O primeiro capítulo buscou selecionar os atributos mais relacionados com a produtividade a partir de uma análise multivariada para a delimitação de zonas de manejo. O método de análise multivariada utilizado foi pelos Mínimos Quadrados Parciais por Análise Discriminante (PLS-DA), o qual se mostrou eficiente em selecionar as melhores variáveis para a definição de zonas de manejo.

As variáveis do estudo que foram selecionadas pela PLS-DA foram a areia total, argila, potássio, NDVI, condutividade elétrica aparente do solo à 0,20 m e a CEa à um metro de profundidade. Após a seleção das variáveis, as mesmas provaram ser as melhores para relacionar com a produtividade, concordando melhor à zona de manejo gerada com todas as variáveis estudadas. A combinação das variáveis que apresentou a melhor concordância com a produtividade foi entre areia total, CEa à 0,20 metros e potássio. Entretanto, visando a maior viabilidade operacional e pelos bons resultados apresentados, as zonas de manejo delimitadas utilizando a CEa à 1 m de profundidade é a mais indicada.

O segundo capítulo constou na delimitação das zonas de manejo por meio da CEa e a sua influência com a física do solo. A CEa utilizada foi levantada pela leitura à 0,50, 1,00 e 2,00 m de profundidade. Após análise entre os atributos físicos das zonas de manejo aqui estudados, sendo granulometria, densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo. Para o presente estudo, concluiu-se que não houve influência dos atributos físicos analisados que afetassem a CEa na delimitação das zonas de manejo.