

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
COORDENADORIA ACADÊMICA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Cristielle König Marin

**CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO A PARTIR DA
AMOSTRAGEM POR ZONAS DE MANEJO**

Cachoeira do Sul, RS
2021

Cristielle König Marin

**CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO A PARTIR DA AMOSTRAGEM
POR ZONAS DE MANEJO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em **Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Leonel Bottega

Cachoeira do Sul, RS
2021

Cristielle König Marin

**CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO A PARTIR DA AMOSTRAGEM
POR ZONAS DE MANEJO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em **Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 26 de agosto de 2021

Eduardo Leonel Bottega, Dr. (UFSM)
{Presidente/Orientador}

Christiano de Carvalho Lamb, Me.
(Escola Estadual Técnica Nossa Senhora da Conceição)

Zanandra Boff de Oliveira, Dra. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2021

EPÍGRAFE

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus pela saúde e força para concluir esta etapa muito importante na minha vida.

Aos meus pais Ladislau dos Santos Marin e Maria Cristina König Marin pela educação, pelo amor, pela compreensão e apoio durante este período.

Aos meus irmãos, por todo amor e compreensão neste momento.

A todos os professores e servidores da Universidade Federal de Santa Maria – Campus Cachoeira do Sul, que foram essenciais na minha trajetória acadêmica.

Ao meu orientador Eduardo Leonel Bottega, pelo ensino, paciência e aprendizado.

A Universidade Federal de Santa Maria – Campus Cachoeira do Sul, pela estrutura, e contribuição para minha formação.

Aos Senhores Maurício Tisato e Paulo Ebbesen, pela disponibilidade das áreas de estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de iniciação científica através do programa PIBIC.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO A PARTIR DA AMOSTRAGEM POR ZONAS DE MANEJO

AUTOR: Cristielle König Marin
ORIENTADOR: Eduardo Leonel Bottega

Técnicas de agricultura de precisão permitem o manejo localizado de fatores do solo que influenciam o desempenho produtivo das culturas, a densidade é um desses fatores. A densidade do solo (D_s) é uma propriedade variável, sendo influenciada por alguns fatores, como: estrutura, grau de compactação, teor reduzido de matéria orgânica e menor agregação. A partir do mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é possível detectar variações inerentes aos fatores químicos e físicos do solo, possibilitando delimitar zonas de manejo (ZM), utilizadas como base para a amostragem e caracterização de solo. O objetivo do trabalho foi mapear a variabilidade espacial da CEa, delimitar ZM e caracterizar, em cada ZM, a D_s em duas profundidades, a fim de avaliar se a delimitação de ZM, com base na mensuração da CEa é capaz de diferenciar os graus de D_s em áreas de cultivo. O trabalho foi realizado em duas propriedades, localizadas em Cachoeira do Sul/RS. Os maiores valores de D_s foram observados para a camada de 0,1 – 0,2 m, independentemente da área. A delimitação de ZM, com base no mapeamento da variabilidade espacial da CEa foi capaz de diferenciar os valores médios de D_s entre a ZM 1 ($1,53 \text{ g cm}^{-3}$) e ZM 2 ($1,67 \text{ g cm}^{-3}$) na Área A, na camada de 0,1 – 0,2 m. Foi observada diferença estatística para os valores médios de D_s , na ZM 1, camada 0,1 – 0,2 m, quando comparadas as duas áreas estudadas: A ($1,53 \text{ g cm}^{-3}$) e B ($1,64 \text{ g cm}^{-3}$).

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Compactação do solo. Condutividade elétrica aparente do solo.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF SOIL DENSITY BASED ON MANAGEMENT ZONES SAMPLING

AUTHOR: Crístielle König Marin
ADVISOR: Eduardo Leonel Bottega

Precision agriculture techniques allow the localized management of soil factors that influence the productive performance of crops, density is one of these factors. Soil density (Ds) is a variable property, being influenced by some factors, such as: structure, degree of compaction, reduced content of organic matter and less aggregation. From the mapping of the spatial variability of the apparent electrical conductivity of the soil (CEa) it is possible to detect variations inherent to the chemical and physical factors of the soil, making it possible to delimit management zones (MZ), used as a basis for sampling and soil characterization. The objective of the work was to map the spatial variability of the ECa, delimit MZ and characterize, in each MZ, the Ds at two depths, in order to assess whether the MZ delimitation, based on the measurement of the ECa, is able to differentiate the degrees of Ds in cultivated areas. The work was carried out in two properties, located in Cachoeira do Sul/RS. The highest values of Ds were observed for the 0.1 – 0.2 m layer, regardless of the area. The MZ delimitation, based on the mapping of the spatial variability of the ECa, was able to differentiate the mean values of Ds between MZ 1 (1.53 g cm⁻³) and MZ 2 (1.67 g cm⁻³) in the Area A, in the 0.1 – 0.2 m layer. A statistical difference was observed for the mean values of Ds, in MZ 1, layer 0.1 - 0.2 m, when comparing the two studied areas: A (1.53 g cm⁻³) and B (1.64 g cm⁻³).

Keywords: Precision Agriculture. Soil compaction. Apparent soil electrical conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grade amostral utilizada para mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) na área A de 26,7 hectares (a) e na área B de 24,1 hectares (b).....	13
Figura 2. Matriz de Wenner e Medidor de condutividade elétrica portátil, marca Landviser®, modelo LandMapper® ERM-02 (a)* e Mensuração da CEa no campo (b). *Imagem sem escala, apenas ilustrativa.	14
Figura 3. Coleta de amostras indeformadas de solo nas profundidades de 0 – 0,1 m (a e b), na profundidade de 0,1 – 0,2 m (c) e amostra preparada para ser levada ao laboratório (d).	17
Figura 4. Mapa temático da variabilidade espacial da CEa (a), semivariograma e gráfico de validação cruzada resultantes da modelagem da dependência espacial (b) representativos da área de estudos A.	18
Figura 5. Mapa temático da variabilidade espacial da CEa (a), semivariograma e gráfico de validação cruzada resultantes da modelagem da dependência espacial (b) representativos da área de estudos B.	19
Figura 6. Mapas de zonas de manejo delimitados com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo das áreas A (a) e B (b). Pontos com retângulo vermelho indicam locais de amostragem de solo para análise granulométrica e caracterização da densidade do solo (0 – 0,1; 0,1 – 0,2 m).....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo: condutividade elétrica aparente (CEa; mS m ⁻¹), densidade do solo (Ds; g cm ⁻³), umidade do solo (Umd, g g ⁻¹), areia, silte e argila, para as zonas de manejo delimitadas na área A.....	21
Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo: condutividade elétrica aparente (CEa; mS m ⁻¹), densidade do solo (Ds; g cm ⁻³), umidade do solo (Umd, g g ⁻¹), areia, silte e argila (%), para as zonas de manejo delimitadas na área B.....	22
Tabela 3. Resultados do teste de médias para densidade do solo, em cada área estudada, em função da caracterização por zonas de manejo.....	23
Tabela 4. Resultados do teste de médias para densidade do solo, entre as áreas estudadas, em função da caracterização por zonas de manejo.....	24
Tabela 5. Resultados do teste de médias para densidade do solo, em cada área, em função das diferentes camadas estudadas em cada zona de manejo.....	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4. CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

A densidade do solo é uma propriedade variável que depende da estrutura e compactação do solo. O material constituinte do solo tem grande influência sobre o valor da densidade, assim como os sistemas de uso e manejo e tipo de cobertura vegetal. Os valores de densidade nos solos podem ser extremamente variáveis, onde, se pode ter em solos de mesma textura densidades diferenciadas no perfil. A densidade tende a aumentar com a profundidade, variando em função de diversos fatores, como, teor reduzido de matéria orgânica, menor agregação, maior compactação, diminuição da porosidade do solo (BICALHO, 2011). A densidade do solo pode ser utilizada em estudos como indicador das alterações da estrutura do solo (CAMPOS, 2021). Segundo Stone; Silveira (2001) a densidade do solo é um fator que influencia o desenvolvimento e produtividade das plantas.

O método mais utilizado para a mensuração da densidade do solo no campo é o do anel volumétrico (MAV), que consiste, na inserção de um anel de cilindro metálico e de volume conhecido, no solo. Na retirada da amostragem de solo é importante não compactar a amostra e solo e preencher todo o anel volumétrico com a amostra (PIRES; ROSA; TIMM, 2011). Outros métodos também usados para a mensuração da densidade do solo são o do torrão parafinado (MTP) (VERAS, 2015), tomografia computadorizada (MTC) (PIRES et al., 2010), sondas de superfície nêutron-gama (MSN) (PIRES; ROSA; TIMM, 2011), entre outros. A densidade do solo é um indicativo da qualidade física do solo, característica esta que influencia diretamente na produtividade das culturas (BARBOSA et al., 2019). A estrutura do solo é outro fator de influência para a produção agrícola, proporcionando as condições físicas necessárias para o crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas. Altos níveis de compactação em um solo, limita o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (SKALINSKI, 2018).

Para uma melhor produtividade, se faz o uso da agricultura de precisão (AP) que é uma ferramenta que auxilia no uso eficiente de insumos agrícolas e dos recursos naturais, utilizando a variabilidade espacial e temporal como recurso de tecnologia de informação (JENRICH, 2011). Além disso, a AP tem o intuito de gerenciar todo o processo de produção agrícola, e não somente, processos individuais de manejo (MIRANDA, 2006). Com isso, tem-se o gerenciamento completo da área de cultivo, históricos de produtividade, quantificação de fertilizantes agrícolas (REGHINI; CAVICHIOLI, 2020). A partir da AP e dados históricos da propriedade, pode ser delimitado as zonas de manejo, áreas consideradas aptas para uso agrícola e, dessa forma, adequar o melhor manejo e sistema de cultivo para o talhão (SANCHEZ et al., 2009).

As zonas de manejo podem ser delimitadas a partir da mensuração da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa). A CEa está diretamente relacionada com fatores como a umidade, densidade do solo, matéria orgânica, textura e outros (CORWIN; LESCH, 2003). Trabalhos realizados por Bottega et al. (2019) estudaram a delimitação de zonas de manejo, a partir da mensuração da CEa. Os autores concluíram que as zonas de manejo delimitadas com base na condutividade elétrica aparente do solo foram capazes de diferenciar os teores de argila, potássio, cálcio, soma de bases, capacidade de troca de cátions efetiva e capacidade de troca de cátions á pH 7. Alves et al. (2013) objetivaram definir zonas de manejo com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo e da matéria orgânica em áreas de produção de milho e soja e concluíram que a condutividade elétrica do solo e a matéria orgânica podem ser utilizadas como indicadores de variabilidade de propriedades do solo. Flores et al. (2018) analisaram a variabilidade espacial da CEa determinada em duas profundidades do solo pelo equipamento Veris e sua correlação com produtividade da cultura do algodão. Os autores concluíram que a CEa do solo apresentou correlação moderada com a produtividade do algodão.

O presente estudo teve por objetivos: mapear a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) em duas áreas de cultivo: uma de sequeiro e outra sob pivô central. Delimitar zonas de manejo (ZM) com base na variabilidade espacial da CEa. Caracterizar a densidade do solo, em duas profundidades, em cada zona de manejo delimitada. Avaliar se a delimitação de ZM, com base na variabilidade espacial da CEa, foi capaz de identificar regiões do campo produtivo com diferentes densidades do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em duas propriedades, localizadas no município de Cachoeira do Sul, estado do Rio Grande do Sul, ambas áreas comerciais destinadas ao cultivo de grãos em sistema de plantio direto. O solo da região é classificado como Argissolo vermelho (EMBRAPA, 2013).

A área A possui total de 26,7 ha, em cultivo de sequeiro. O manejo adotado nesta área conta com semeadura direta de soja no verão, gradagem e semeadura de aveia (para pastagem) no inverno. A área B possui 24,1 ha, cultivados sob sistema de irrigação por pivô central. No verão, parte do pivô é semeado com a cultura da soja e parte com a cultura do milho, para

produção de silagem. No inverno a área total é semeada com a cultura da aveia, para pastagem animal.

Foram estabelecidas grades amostrais com pontos espaçados regularmente em 50 x 50 metros (Figura 1). Estes pontos serviram de base para mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}). Utilizou-se um receptor GPS da marca Garmin, modelo GPSMAP 62sc para localização dos pontos amostrais nas áreas de estudo.

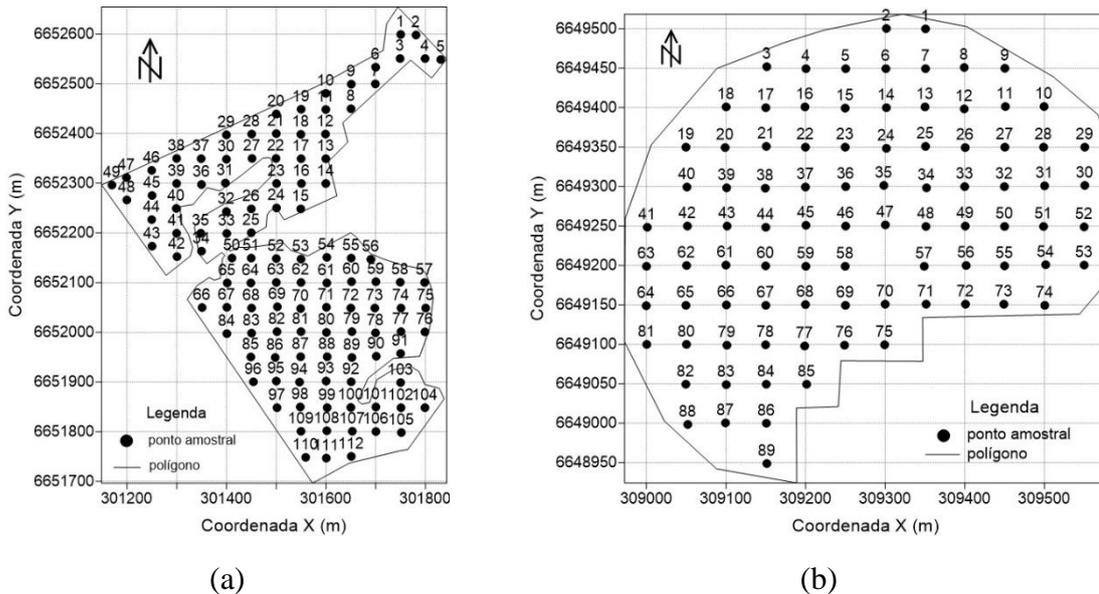


Figura 1. Grade amostral utilizada para mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) na área A de 26,7 hectares (a) e na área B de 24,1 hectares (b).
Fonte: Dados do estudo.

A umidade do solo foi estimada pelo método gravimétrico (padrão estufa). Retirou-se, com auxílio de um trado holandês, amostras de solo representativas da camada de 0 – 0,2 m em pontos aleatórios em ambas as áreas. As amostras foram acondicionadas em cápsulas de alumínio, identificadas e levadas ao laboratório para secagem em estufa, por 24h, á 105°C.

Para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), foi utilizado o método da resistividade elétrica. A resistividade elétrica foi obtida introduzindo na superfície do solo quatro eletrodos igualmente espaçados. Nos eletrodos externos foi aplicada uma corrente elétrica e a diferença de potencial medida nos eletrodos internos. A configuração da montagem dos eletrodos utilizada foi a Matriz de Wenner (CORWIN & HEDRICKX, 2002; CORWIN & LESH, 2003).

A resistividade obtida utilizando a Matriz de Wenner foi calculada pela Equação 1.

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \Delta V}{i} \quad (1)$$

Em que,

ρ = Resistividade, Ohm m⁻¹;
 a = Espaçamento entre eletrodos, m;
 ΔV = Diferença de potencial medida, V; e
 i = Corrente elétrica aplicada, A.

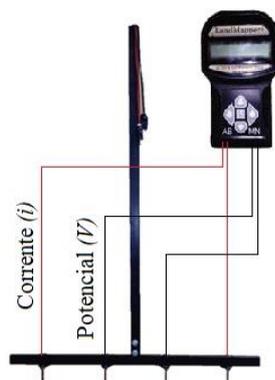
A condutividade elétrica aparente do solo representa o inverso da resistividade, sendo calculada utilizando a Equação 2.

$$CEa = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Em que,

CEa = Condutividade elétrica aparente do solo, S m⁻¹.

Para obtenção da condutividade elétrica aparente do solo foi utilizado um medidor de condutividade elétrica portátil, marca Landviser®, modelo LandMapper® ERM-02. Construiu-se uma matriz de Wenner com quatro eletrodos arranjados de forma a obter medições a 0,20 m de profundidade. A estrutura de suporte dos eletrodos foi desenvolvida utilizando tubos de metalon, parafusos de aço e fios flexíveis em cores diferentes para eletrodos de corrente (fio vermelho) e eletrodos usados na determinação da diferença de potencial (fio preto). O contato entre os parafusos de aço com o metalon foi isolado, revestindo os parafusos com mangueira de PVC. Na Figura 2 é apresentado o medidor portátil e a matriz de eletrodos.



(a)



(b)

Figura 2. Matriz de Wenner e Medidor de condutividade elétrica portátil, marca Landviser®, modelo LandMapper® ERM-02 (a)* e Mensuração da CEa no campo (b). *Imagem sem escala, apenas ilustrativa. Fonte: Autor.

A dependência espacial da condutividade elétrica aparente do solo foi avaliada pelos ajustes de variogramas, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca, definida pela Equação 3.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi+h)]^2 \quad (3)$$

Em que,

$\hat{\gamma}(h)$ = Semivariância em função da distância de separação (h) entre pares de pontos;

h = Distância de separação entre pares de pontos, m;

N (h) = Número de pares experimentais de observações Z(xi) e Z (xi + h) separados por uma distância h.

Foram testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial. Ajustou-se o modelo que apresentou a menor soma dos quadrados do resíduo (OLIVER; WEBSTER, 2014). O modelo selecionado foi avaliado pela técnica de validação cruzada, que consiste em plotar em um gráfico os valores observados em campo *versus* aqueles estimados pelo modelo selecionado. A precisão do modelo é refletida pelos parâmetros obtidos na análise de validação cruzada, que são eles: coeficiente de determinação (quanto mais próximo do valor 1, mais precisas são as estimativas), erro padrão de predição (quanto menor, mais precisas são as estimativas) e intercepto (quanto mais próximo de zero, mais precisas são as estimativas).

Uma vez detectada a dependência espacial e ajustado o modelo teórico de semivariância, foi produzido o mapa de variabilidade espacial da CEa. A interpolação de valores foi realizada utilizando krigagem ordinária. Esse método de interpolação foi selecionado porque fornece as melhores previsões lineares sem viés (BLUP), buscando a variância mínima (OLIVER; WEBSTER, 2014). Para as estimativas de valores em locais não amostrados, foram utilizados 16 vizinhos próximos e um raio de busca igual a 50% do valor do alcance encontrado no ajuste do variograma, de forma a garantir o intervalo de continuidade espacial.

A análise da variabilidade espacial foi realizada utilizando o programa computacional GS+, versão 7. Os valores de CEa resultantes da interpolação por krigagem foram organizados em 2 zonas de manejo. A geração de zonas de manejo foi efetuada utilizando o programa computacional KrigMe, desenvolvido por VALENTE (2010), utilizando o algoritmo de classificação *Fuzzy k-means* na análise de agrupamento dos dados e geração das zonas de manejo.

Após delimitadas as zonas de manejo, procederam-se as caracterizações granulométrica (0 – 0,2 m) e de densidade do solo (0 – 0,1; 0,1 – 0,2 m) em cada uma das zonas. Foram realizadas coletas em três pontos amostrais dentro de cada zona de manejo. A amostragem de solo para caracterização granulométrica foi realizada utilizando uma pá de corte, retirando-se solo representativo da camada de 0 – 0,2 m. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e encaminhadas para análise laboratorial.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, o qual é considerado padrão para avaliação da densidade do solo (ALMEIDA, 1997). Para a coleta da amostra de solo indeformadas, foram utilizados cilindros de aço com bordas biseladas (diâmetro de 4 cm, altura de 3 cm e volume de 37,7 cm³). Os cilindros foram introduzidos no perfil solo, nas camadas de 0 – 0,1 e 0,1 – 0,2 m com auxílio de uma marreta e um trado tipo castelinho, posteriormente, com auxílio de uma pá de corte, os anéis foram retirados do solo. O excesso de solo além das dimensões dos anéis foi removido com uma faca, até se igualar com a superfície do anel.

Os anéis com o solo foram então acondicionados em cápsulas de alumínio e levados para secagem em laboratório. As amostras foram colocadas para secar em uma estufa, a 105°C por período de 24h, posteriormente foram pesadas em balança de precisão, do peso obtido foi descontado o peso da cápsula de alumínio + anel (tara), para obtenção da massa de solo seco. A densidade do solo foi então estimada pela Equação 4.

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (4)$$

Em que,

D_s = Densidade do solo, g cm⁻³;

m_s = Massa de solo seco, g;

V = Volume do anel, cm³.

Na Figura 3 está representada a coleta de amostras indeformadas de solo nas profundidades de 0 – 0,1 m (a; b) e 0,1 – 0,2 m (c) e a amostra preparada para envio ao laboratório para estimativa da densidade do solo (d).

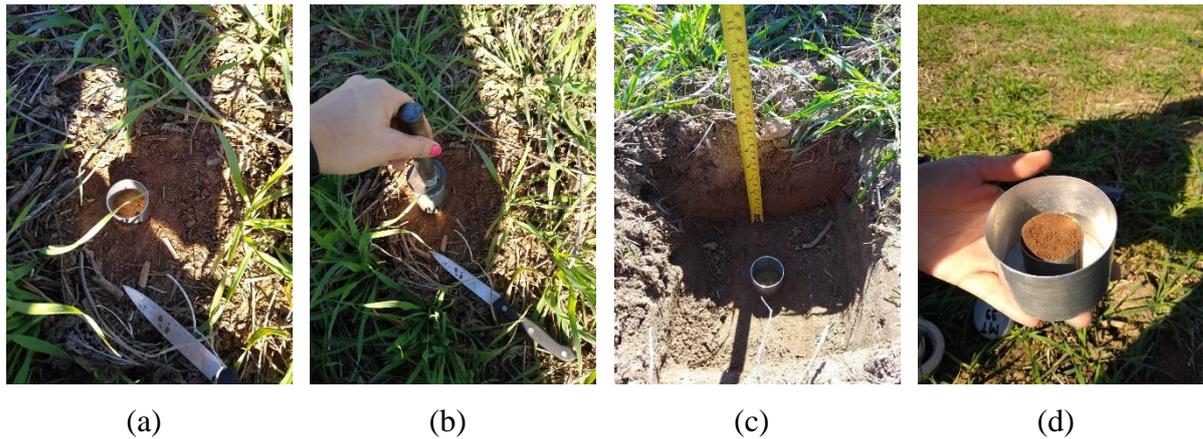


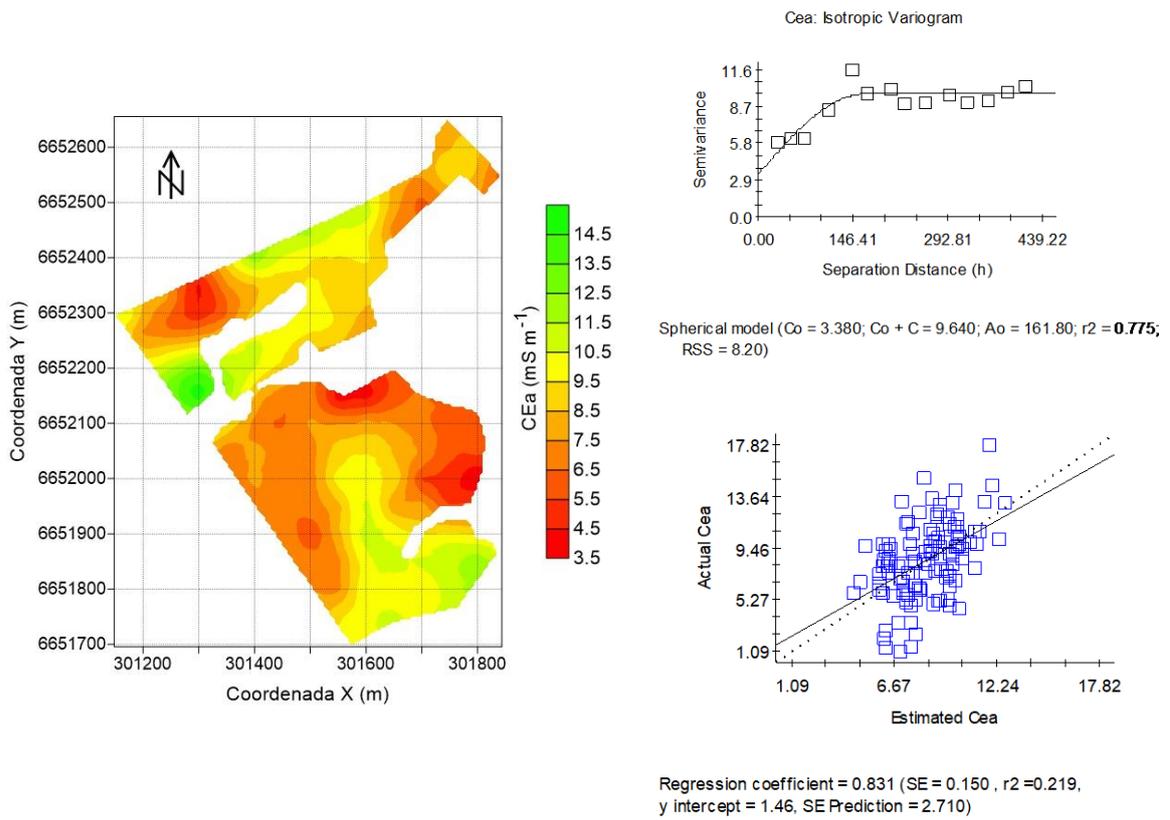
Figura 3. Coleta de amostras indeformadas de solo nas profundidades de 0 – 0,1 m (a e b), na profundidade de 0,1 – 0,2 m (c) e amostra preparada para ser levada ao laboratório (d).

Fonte: Autor.

Os dados de CEa, densidade e granulometria foram submetidos a análise estatística descritiva, calculando-se os valores de mínimo, média, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação. Os valores médios de densidade do solo, entre as zonas de manejo para a mesma área e entre as zonas de manejo das diferentes áreas, foram comparados pelo teste de médias t. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa estatístico *Statistica*, versão 7.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

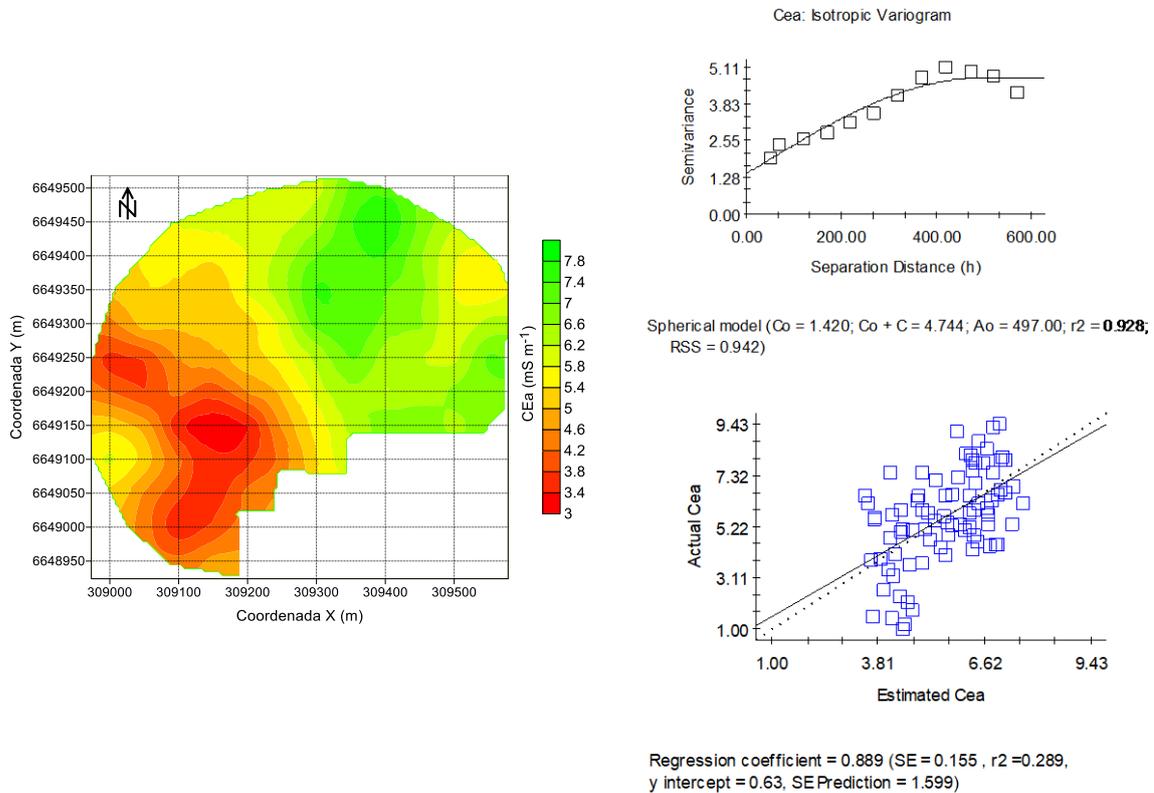
A umidade média, no momento das mensurações da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) para a área A foi de $0,130 \text{ g g}^{-1}$, muito próxima da umidade média observada na área B, de $0,127 \text{ g g}^{-1}$. A CEa apresentou variabilidade espacial nas duas áreas de estudo. O ajuste da modelagem da dependência espacial permitiu a confecção de mapas temáticos representativos desta variabilidade. Os mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da CEa, para as duas áreas de estudo, bem como os semivariogramas e gráficos de validação cruzada são apresentados nas Figuras 4 (área A) e 5 (Área B).



(a)

(b)

Figura 4. Mapa temático da variabilidade espacial da CEA (a), semivariograma e gráfico de validação cruzada resultantes da modelagem da dependência espacial (b) representativos da área de estudos A.



(a)

(b)

Figura 5. Mapa temático da variabilidade espacial da CEa (a), semivariograma e gráfico de validação cruzada resultantes da modelagem da dependência espacial (b) representativos da área de estudos B.
Fonte: Dados do estudo.

O modelo esférico foi o que melhor ajustou a variabilidade espacial da CEa, apresentando coeficiente de ajuste (r^2) de 0,775 para a área A e de 0,928 para a área B. Os valores de alcance observados foram de 161,8 metros para a área A e de 497 metros para a área B, valores estes, superiores a menor distância entre pontos amostrais, que foi de 50 metros. Os valores de alcance podem influenciar na qualidade das estimativas, uma vez que ele determina o número de valores usados na interpolação, assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem ordinária utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representem melhor a realidade (CORÁ et al., 2004). Os coeficientes de regressão da validação cruzada apresentaram valores acima de 0,8 para as duas áreas, indicando um bom ajuste do modelo de semivariância. A validação cruzada comprova que a melhor verificação é aquela resultante dos valores estimados e da realidade de campo (LANDIM, 2006).

Estas variações nos valores de CEa são reflexos das variações presentes nos atributos do solo. Estudos já demonstraram que a CEa é afetada por atributos químicos e físicos do solo. PERALTA et al. (2013) estudaram a correlação entre atributos do solo e a CEa e identificaram que capacidade de troca de cátions e os teores de matéria orgânica (MO) foram positivamente relacionados com a CEa, sendo que a MO exibiu uma correlação significativa com o teor de umidade do solo, permitindo um aumento na capacidade de conduzir corrente elétrica e afetando a variabilidade espacial na escala de campo da Eca. Em estudo realizado por Keller (2019) identificou que a CEa correlacionou-se positivamente com o pH, H₂O, cálcio, magnésio, soma de bases, capacidade de troca de cátions e negativa com o alumínio, acidez potencial e saturação de alumínio, mostrando ser uma ferramenta sensível aos atributos condicionados a acidez. Medeiros et al. (2018), avaliaram essa correlação em duas áreas de solo arenoso e solo argiloso. Os autores concluíram que na área de solo arenoso, correlação positiva foi observada para o fósforo remanescente e não houve correlação entre CEa e matéria orgânica ou entre CEa e teor de argila e de areia. Na área de solo argiloso, a CEa teve correlação positiva significativa com o teor de argila e correlação negativa significativa com o teor de areia.

Na Figura 6 são apresentados os mapas de zonas de manejo, divididos em duas classes, delimitadas com base na variabilidade espacial da CEa. Em ambas as áreas, a classe ZM 1 representa os locais de baixa CEa e a classe ZM 2 os locais de alta CEa. Em função das áreas serem pequenas, o mapa de zonas de manejo foi dividido apenas em duas classes, pois, de

acordo com Tisseyre; McBratney (2008) o aumento do número de classes leva a irregularidade das áreas, tornando pequenas zonas de manejo difíceis de serem manejadas.

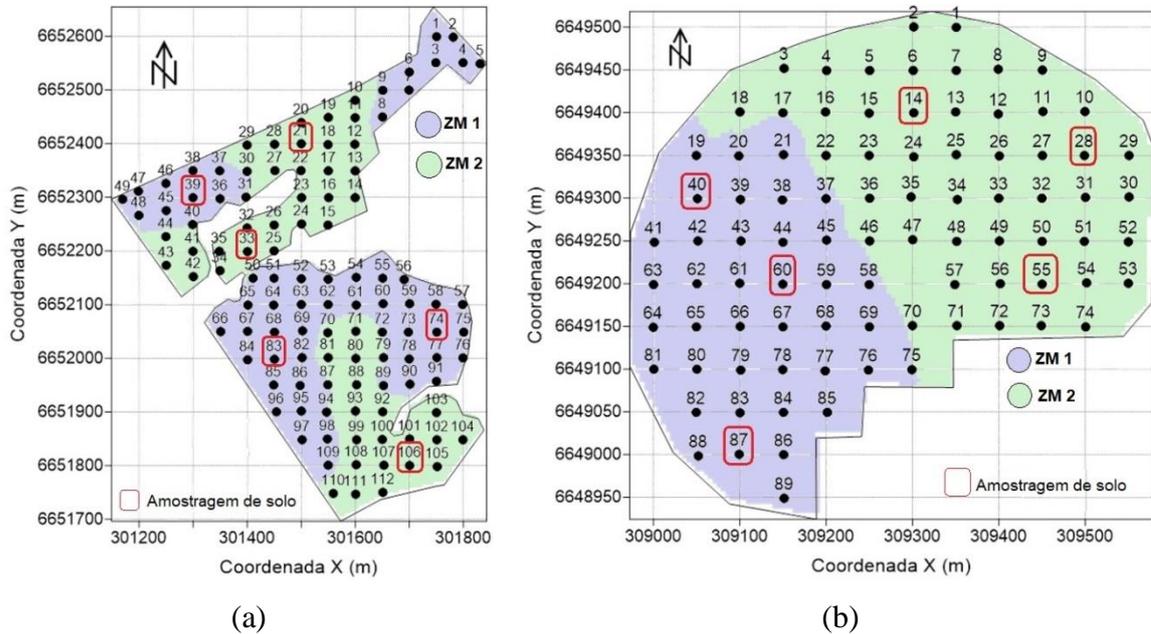


Figura 6. Mapas de zonas de manejo delimitados com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo das áreas A (a) e B (b). Pontos com retângulo vermelho indicam locais de amostragem de solo para análise granulométrica e caracterização da densidade do solo (0 – 0,1; 0,1 – 0,2 m).

Fonte: Dados do estudo.

Na área A, as zonas de manejo delimitadas não apresentaram continuidade espacial, como observado na área B, onde as duas classes foram muito bem delimitadas. Este fato pode ser explicado pelo manejo adotado pelo produtor. A ZM 1 da área B indica a região do pivô destinada ao cultivo de milho para silagem. Neste local, tem-se um intenso tráfego de máquinas e, em função do manejo ser mais intenso, a exportação de nutrientes do solo também é maior. Em áreas de intensa exploração é observado baixos teores de matéria orgânica e nutrientes ou, exaurimento do material orgânico do solo (MOLIN; CASTRO, 2008), alterando as características físicas do solo e influenciando de forma direta o armazenamento de água, principal responsável pela condução de corrente elétrica.

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros estatísticos descritivos dos atributos do solo: condutividade elétrica aparente (CEa; mS m^{-1}), densidade do solo (D_s ; g cm^{-3}), umidade do solo (Umd, g g^{-1}), areia, silte e argila, para as zonas de manejo delimitadas na área A.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo: condutividade elétrica aparente (CEa; mS m⁻¹), densidade do solo (Ds; g cm⁻³), umidade do solo (Umd, g g⁻¹), areia, silte e argila, para as zonas de manejo delimitadas na área A.

Área	ZM	Atributo	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão	CV (%)
A	1	CEa (mS m ⁻¹)	3,62	6,91	8,48	0,98	14,18
		Ds (0 – 0,1 m)	1,31	1,34	1,38	0,04	3,05
		Umd (0 – 0,1 m)	0,110	0,128	0,145	0,018	13,84
		Ds (0,1 – 0,2 m)	1,50	1,53	1,56	0,03	1,94
		Umd (0,1 – 0,2 m)	0,103	0,124	0,138	0,018	14,85
		Areia	-	63	-	-	-
		Silte	-	19	-	-	-
	Argila	-	18	-	-	-	
	2	CEa (mS m ⁻¹)	8,49	10,05	14,94	1,12	11,14
		Ds (0 – 0,1 m)	1,40	1,46	1,54	0,08	5,21
		Umd (0 – 0,1 m)	0,093	0,127	0,169	0,038	30,40
		Ds (0,1 – 0,2 m)	1,61	1,67	1,73	0,06	3,75
		Umd (0,1 – 0,2 m)	0,104	0,123	0,146	0,021	17,41
		Areia	-	62	-	-	-
Argila		-	18	-	-	-	

A CEa variou de 3,62 a 14,94 mS m⁻¹, sendo o maior valor médio observado para a ZM 2 (10,05 mS m⁻¹). Estudos conduzidos por Bottega et al., (2019) indicaram haver relação entre a produtividade de soja e a CEa, os autores observaram que regiões com CEa média acima de 10,2 mS m⁻¹ apresentaram também as maiores produtividade de soja. Pott et al. (2017) avaliaram a relação da CEa com a produtividade de grãos de milho e concluíram que a CEa do solo tem potencialidade para delinear a variabilidade espacial da produtividade de grãos da cultura. Estes estudos demonstram o potencial de utilização da CEa como fator delimitador de ZM para o manejo de atributos do solo associados a produtividade das culturas.

Outro fato interessante observado no presente estudo foi que, na ZM 2 (área de maior CEa) foram obtidos os maiores valores de densidade do solo (Ds), para ambas as profundidades estudadas, quando comparados com valores de Ds obtidos na ZM 1. Considerando a camada de 0 – 0,1 m, a Ds média observada na ZM 1 foi de 1,34 g cm⁻³, enquanto a Ds média na ZM 2 foi

de $1,46 \text{ g cm}^{-3}$. Já para a faixa de $0,1 - 0,2 \text{ m}$, a ZM 1 apresentou Ds média de $1,53 \text{ g cm}^{-3}$ e a ZM 2 de $1,67 \text{ g cm}^{-3}$, indicando, mais uma vez, o potencial da CEa como fator delimitador de zonas de manejo. Resultados semelhantes também foram encontrados por Arevalo-Hernandez et al. (2015), em estudo conduzido em cultivo de sequeiro, resultando em uma Ds média nas profundidades de $0 - 0,1 \text{ m}$ de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$.

Os coeficientes de variação para as estimativas da Ds, independente da camada de solo avaliada e da ZM, ficaram abaixo de 6%, indicando baixa variabilidade ($CV < 12\%$) de acordo com proposto por Warrick e Nielsen (1980). Em relação a composição granulométrica do solo, foi observado que ambas as ZM apresentaram valores muito próximos para os atributos areia, silte e argila, indicando que as variações na Ds são oriundas de outros fatores e não daqueles associados a textura do solo.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros estatísticos descritivos dos atributos do solo: condutividade elétrica aparente (CEa; mS m^{-1}), densidade do solo (Ds; g cm^{-3}), umidade do solo (Umd, g g^{-1}), areia, silte e argila, para as zonas de manejo delimitadas na área B.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo: condutividade elétrica aparente (CEa; mS m^{-1}), densidade do solo (Ds; g cm^{-3}), umidade do solo (Umd, g g^{-1}), areia, silte e argila (%), para as zonas de manejo delimitadas na área B.

Área	ZM	Atributo	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão	CV (%)
A	1	CEa (mS m^{-1})	3,03	4,46	5,43	0,62	14,00
		Ds ($0 - 0,1 \text{ m}$)	1,25	1,35	1,54	0,16	12,12
		Umd ($0 - 0,1 \text{ m}$)	0,136	0,158	0,186	0,026	16,19
		Ds ($0,1 - 0,2 \text{ m}$)	1,61	1,64	1,66	0,03	1,67
		Umd ($0,1 - 0,2 \text{ m}$)	0,138	0,146	0,154	0,008	5,31
		Areia ($0 - 0,2 \text{ m}$)	-	59	-	-	-
		Silte ($0 - 0,2 \text{ m}$)	-	17	-	-	-
B	2	Argila ($0 - 0,2 \text{ m}$)	-	24	-	-	-
		CEa (mS m^{-1})	5,44	6,43	7,77	0,58	8,97
		Ds ($0 - 0,1 \text{ m}$)	1,26	1,46	1,62	0,18	12,29
		Umd ($0 - 0,1 \text{ m}$)	0,132	0,140	0,148	0,008	5,40
		Ds ($0,1 - 0,2 \text{ m}$)	1,65	1,74	1,81	0,08	4,87
		Umd ($0,1 - 0,2 \text{ m}$)	0,119	0,126	0,137	0,010	7,82

Areia (0 – 0,2 m)	-	54	-	-	-
Silte (0 – 0,2 m)	-	22	-	-	-
Argila (0 – 0,2 m)	-	24	-	-	-

A área B apresentou menor amplitude dos valores de CEa, que variaram de 3,03 a 7,77 mS m⁻¹. A Ds média do solo, independente da ZM, foi menor para a camada de 0 – 0,1 m quando comparada a camada de 0,1 – 0,2 m, esses resultados corroboram com os obtidos por SILVEIRA et al. (2008) que observaram valores semelhantes para a Ds nas profundidades de 0 – 0,1 m e 0,1 m – 0,2 m. Mallmann; Portela; Kaiser, (2013) avaliaram em estudo que a Ds na profundidade de 0 – 0,1 m é menor em relação as outras camadas nos sistemas de manejo estudados (plantio direto, plantio direto compactado e plantio direto escarificado). O que também foi observado em estudo realizado por Assis et al. (2015), onde a Ds nas camadas 0 – 0,1 m foi a menor encontrada para área de pastagem degradada. Custódio et al. (2015) atribuíram os menores valores encontrados para a Ds nas camadas de 0 – 0,1 m em sistema integração lavoura pecuária e da integração lavoura pecuária floresta ao acúmulo de matéria orgânica que os sistemas promovem.

Na Tabela 3 é apresentado o resultado do teste de médias para densidade do solo, em cada área estudada, em função da caracterização por zonas de manejo. Diferença estatística significativa foi observada apenas para a comparação entre as médias de Ds na camada de 0,1 – 0,2 m, entre as ZM 1 e 2 para a área A.

Independente da área de estudos, os maiores valores de Ds foram observados para a ZM 2, ou seja, aquela de maior valor médio de CEa, além disso, os maiores valores de Ds foram obtidos para a camada de 0,1 – 0,2 m, independente da área de estudo ou da ZM. Embora o teste de médias não tenha detectado diferenças significativas (exceto para a situação relatada no parágrafo anterior), este fato, considerando os limiares limítrofes de Ds, que indicam certo grau de compactação, demonstram que a delimitação de zonas de manejo, com base na variabilidade espacial da CEa, tem potencial como fator direcionador de amostragem para caracterização da Ds, orientando em quais locais do campo de produção pode haver diferenças.

Tabela 3. Resultados do teste de médias para densidade do solo, em cada área estudada, em função da caracterização por zonas de manejo.

Área	Atributo	Média ZM 1	Média ZM 2	Valor-t	g.l.	p-valor
A	Ds 0-0,1	1,34	1,46	-2,42	4,00	0,07

	Ds 0,1-0,2	1,53	1,67	-3,39	4,00	0,03
B	Ds 0-0,1	1,35	1,46	-0,73	4,00	0,51
	Ds 0,1-0,2	1,64	1,74	-1,84	4,00	0,14

Negrito indica diferença significativa entre as médias, na linha, pelo teste t ($p < 0,05$). g.l.: graus de liberdade.

Na Tabela 4 é apresentado o resultado do teste de médias para densidade do solo, entre as áreas estudadas, em função da caracterização por zonas de manejo. Foi observado diferença estatística significativa para os valores médios de Ds entre as áreas A e B para a camada de solo de 0,1 – 0,2 m, com valores de 1,53 e 1,64 g dm⁻³, respectivamente. Este fato pode ser resultado do manejo adotado na Área B, onde possivelmente se tem um maior tráfego de máquinas agrícolas e uma maior lotação animal no período de inverno. Estudos apontam que o maior tráfego de máquinas aumenta a compactação do solo e densidade do solo, afetando o desenvolvimento das raízes (SANTOS, et al. 2020). Além disso, conforme Pereira et al. (2013) a compactação do solo ocasiona o aumento da densidade do solo, diminuindo a porosidade total e condutividade elétrica. Bono; Macedo; Tormena (2013) avaliaram as propriedades físicas do solo em pastagem de *B. brizantha* e constatou que as maiores densidades, nas camadas superficiais do solo devem-se ao pisoteio animal além da movimentação de tratores, máquinas e implementos na área.

Tabela 4. Resultados do teste de médias para densidade do solo, entre as áreas estudadas, em função da caracterização por zonas de manejo.

ZM	Atributo	Média área A	Média área B	Valor-t	g.l.	p-valor
1	Ds 0-0,1	1,34	1,35	-0,18	4,00	0,86
	Ds 0,1-0,2	1,53	1,64	-4,80	4,00	0,01
2	Ds 0-0,1	1,46	1,46	0,01	4,00	1,00
	Ds 0,1-0,2	1,67	1,74	-1,17	4,00	0,31

Negrito indica diferença significativa entre as médias, na linha, pelo teste t ($p < 0,05$). g.l.: graus de liberdade.

Na Tabela 5 é apresentado o resultado do teste de médias para densidade do solo, em cada área, em função das diferentes camadas estudadas em cada zona de manejo. Os valores de Ds da camada 0,1 – 0,2 m foram maiores e diferiram estatisticamente dos valores de Ds da camada 0 – 0,1 m na Área A, para ambas as ZM. Na Área B, embora também tenham sido observados maiores valores médios de Ds para a camada 0,1 – 0,2 m quando comparados com

os valores médios de Ds da camada 0 – 0,1 m, diferença estatística significativa foi observada apenas para a ZM 1.

Tabela 5. Resultados do teste de médias para densidade do solo, em cada área, em função das diferentes camadas estudadas em cada zona de manejo.

Área	ZM	Média Ds 0-0,1	Média Ds 0,1-0,2	Valor-t	g.l.	p-valor
A	1	1,34	1,53	-6,71	4,00	0,00
	2	1,46	1,67	-3,71	4,00	0,02
B	1	1,35	1,64	-3,02	4,00	0,04
	2	1,46	1,74	-2,47	4,00	0,07

Negrito indica diferença significativa entre as médias, na linha, pelo teste t ($p < 0,05$). g.l.: graus de liberdade.

Os valores de Ds tendem a aumentar sob plantio direto contínuo e rotação de culturas, devido aos teores de matéria orgânica presente nas primeiras camadas de solo. A macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo também aumentam nesses sistemas de cultivo (SILVEIRA, et al. 2008). De acordo com Santos et al. (2019) elevados valores de Ds associados aos baixos valores de porosidade expressam as práticas de manejo como, revolvimento do solo e variabilidade dos nutrientes do solo.

Estudos indicam que o pisoteio animal em sistema de pastejo contínuo e rotacionado, alteram as propriedades físicas do solo, como a microporosidade, levando a compactação dos solos (CERVELATI, et al. 2011). Collares (2005) objetivou avaliar os impactos do tráfego de máquinas e do pisoteio animal nos atributos do solo e, concluiu que a compactação imediata pode ser obtida em solos com tráfego de máquinas, enquanto os solos com pisoteio animal pode ser observado aumento da compactação do solo e significativa nas camadas superficiais alterando a macroporidade do solo. Mazurana et al. (2013) observaram que o tráfego de máquinas em sistema não cultivado (pousio) afetou a macroporosidade do solo até a profundidade de 0,10 m, influenciando também na densidade do solo.

4. CONCLUSÃO

Foi detectada variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) nas duas áreas estudadas.

Zonas de manejo (ZM) com maior valor médio de CEa apresentaram também os maiores valores médios de densidade do solo (Ds), independentemente da camada analisada.

Os maiores valores de Ds foram observados para a camada de 0,1 – 0,2 m, independentemente da área estudada.

Independente da granulometria o método proposto foi capaz de detectar diferenças de densidades a partir da CEa.

A delimitação de ZM, com base no mapeamento da variabilidade espacial da CEa foi capaz de diferenciar os valores médios de Ds entre a ZM 1 ($1,53 \text{ g cm}^{-3}$) e ZM 2 ($1,67 \text{ g cm}^{-3}$) na Área A, na camada de 0,1 – 0,2 m.

Foi observada diferença estatística para os valores médios de Ds, na ZM 1, camada 0,1 – 0,2 m, quando comparadas as duas áreas de estudo: A ($1,53 \text{ g cm}^{-3}$) e B ($1,64 \text{ g cm}^{-3}$).

Sugere-se que novos estudos sejam realizados pois o mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo mostrou potencial na diferenciação da densidade do solo em diferentes profundidades.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, B. G. de. et al. **Manual de métodos de análise de solo: Densidade do solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.
- ALVES, S. M. de F. et al. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, 2013.
- AREVALO-HERNANDEZ, C. O. et al. Aspectos físicos da qualidade do solo sob diferentes usos no Platô de Irecê, Bahia. In: XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 1., 2015, Natal. **Anais XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Natal: 2015. p. 1-4.
- ASSIS, P. C. R. et al. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 309-316, 2015.
- BARBOSA, M. L. P. et al. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho em um latossolo amarelo distrocoeso. In: IV Congresso Internacional das Ciências Agrárias, 4., 2019, Teresina. **Anais IV Congresso Internacional das Ciências Agrárias**. Teresina: 2019. p. 1-7.
- BICALHO, I. M. Um estudo da densidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo. *Enciclopédia Biosfera, Goiânia*, v. 7, n.12, p. 1-9, 2011.
- BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A. Qualidade física do solo em um latossolo vermelho da região sudoeste dos cerrados sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 743-753, 2013.
- BOTTEGA, E. L. et al. Altitude, produtividade e condutividade elétrica aparente do solo como fatores delimitadores de zonas de manejo em sistema de plantio direto. In: 5º Congresso Sul – Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas. 5., 2019, Não-Me-Toque. **Anais do 5º Congresso Sul – Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas**. Não-Me-Toque: CESPOL, 2019. p. 14-24.
- BOTTEGA, E. L. et al. Condutividade elétrica como ferramenta no manejo por sítio específico de atributos do solo. In: XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA. 48., 2019. Campinas. **Anais XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Campinas. 2019. p. 1-4.
- CAMPOS, B. H. **Estudo de caso de atributos físicos de solo no bioma cerrado, em diferentes sistemas de uso e manejo**. 2021. 35 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2021.
- CERVELATI, K. F. et al. Efeito de diferentes sistemas de pastejo em atributos físicos do solo. **PUBVET**, v. 5, p. 1136-1142, 2011.
- COLLARES, G. L. **Compactação em latossolos e argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Vol. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

CORWIN, D.L.; HENDRICKX, J.M.H. Electrical Resistivity: Wenner Array. In: SILVA, J.S. *Methods of Soil Analysis Part 4 Physical Methods*, Madison, Wisconsin, USA: **SSSA Book Series**, n. 5, p.1282-1287. 2002.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. **Agronomy Journal**, v.95, n. 3, p. 455-471. 2003.

CUSTÓDIO, G. D. et al. Densidade do solo e densidade relativa-indicadores da qualidade física de um latossolo amarelo sob diferentes manejos de pastagens e mata nativa. **Campo Digital**, v. 10, n. 1, 2015.

DOS SANTOS, C. M. M. et al. Atributos físicos do solo de sistemas agroflorestais agroecológicos na Zona da Mata Rondoniense. In: VI Fórum Brasil de Áreas Degradadas, 6., 2019, Viçosa. **Anais VI Fórum Brasil de Áreas Degradadas**. Viçosa: 2019. p. 1-5.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica. 353p. 2013.

FLORES, J. P. M. et al. Condutividade elétrica aparente do solo correlacionada com a produtividade de culturas. In: XII Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo. 12., 2018, Xanxerê, **Anais XII Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo**. Xanxerê: 2018. p. 1-4.

JENRICH, M. Potencial da agricultura de conservação de precisão como meio de aumentar a produtividade e a renda dos pequenos agricultores. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 66, n. 6, pág. 171A-174A, 2011.

KELLER C. **Condutividade elétrica aparente como ferramenta de espacialização com alta resolução de atributos do solo**. 2019. 90 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. RS. 2019.

LANDIM, P.M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terrae Didatica**, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

MALLMANN M. S.; PORTELA, V. O.; KAISER, D. R. Efeito de diferentes manejos de solo na infiltração de água em um Latossolo Vermelho. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 34., 2013, Florianópolis, **Anais XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Florianópolis, 2013. p. 1-4.

MAZURANA, M. et al. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1185-1195, 2013.

MEDEIROS, W. N. et al. Condutividade elétrica aparente do solo em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 1, p. 43-52, 2018.

MIRANDA, E. **Modelagem e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2006. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2006.

MOLIN, J.P.; CASTRO, C.N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, p.567- 573, 2008.

OLIVER, M.A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v.113, p.56-69, 2014.

PERALTA, N. R. et al. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 93, n. 2, p. 205-218, 2013.

PEREIRA, M. M. et al. Determinação da condutividade hidráulica saturada em um permeâmetro de carga constante. In: XXV Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. 15., 2013, São Cristóvão, **Anais XXV Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**. São Cristóvão, 2013. p. 1-6.

PIRES, L. F. et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p.161-170, 2011.

POTT, L. P. et al. **Relação da condutividade elétrica aparente do solo com a produtividade de grãos de milho**. Reunião Técnica Anual da Pesquisa do Milho. Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul: safras 2017/2018 e 2018/2019 / LXII Reunião Técnica Anual da Pesquisa do Milho; XLV Reunião Técnica Anual da Pesquisa do Sorgo, Sertão, RS, Brasília, DF: Embrapa, 2017.

PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Manejo do Solo visando o aumento da produtividade das culturas, 2015.

REGHINI, F. L.; CAVICHIOLI, F. A. Utilização de geoprocessamento na agricultura de precisão. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 329-339, 2020.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Modificações físicas em solos manejados sob sistema de plantio direto. Siembra directa: **Una herramienta para la agricultura conservacionista, Florianópolis**. Anais, CD ROM, 1999.

SANCHEZ, R. B. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedofomas. **Bragantia**, v. 68, p. 1095-1103, 2009.

SANTOS, F. F. dos. et al. Uso de bioestimulante na cultura da soja sobre tráfego controlado. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e238997096-e238997096, 2020.

SILVEIRA, P. M. et al. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 3, 2008.

SKALINSKI, I. Eficiência das plantas de cobertura na recuperação da estrutura do solo. 2018. 42 f. Monografia (Bacharel em Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira do Sul, Cerro Largo, RS, 2018.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

TISSEYRE, B.; MCBRATNEY, A. B. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an application to viticulture. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 1-2, p. 101–113, 2008.

VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

VERAS, C. M. dos A. **Áreas com potenciais para regeneração de atributos do solo no norte maranhense**. 2015. 77 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista – Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, SP, 2015.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. cap. 2, p. 319-344.