

MAPEAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO POR DIFERENTES EQUIPAMENTOS

Eduardo Leonel Bottega^{1*}; Zanandra Boff de Oliveira¹; Telmo Jorge Carneiro Amado²; Bruno Cauê Ribas de Abreu⁴

¹Docente, Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Cachoeira do Sul, Cachoeira do Sul - RS, Brasil. *Autor correspondente: bottega.elb@gmail.com

²Docente, Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Ciências Rurais (CCR), Departamento de Solos, Santa Maria - RS, Brasil.

³Mestrando, Agricultura de Precisão, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Colégio Politécnico, Santa Maria - RS, Brasil.

Recebido: 31/03/2021; Aceito: 31/01/2022

RESUMO: A partir do mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo (CE) é possível caracterizar a variabilidade espacial de um campo de produção de forma rápida e com baixo custo. Atualmente, no mercado, existem equipamentos produzidos por diferentes empresas, que mensuram a CE do solo por diferentes métodos (indução eletromagnética e resistividade elétrica) e em diferentes profundidades. O presente estudo objetivou quantificar a similaridade entre mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo, mensurada pelo método da resistividade elétrica, em diferentes datas, profundidades e utilizando diferentes equipamentos. O trabalho foi realizado no município de Cachoeira do Sul, estado do Rio Grande do Sul, em uma área comercial destinada ao cultivo de grãos, em sistema de plantio direto sob pivô central. O mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo foi realizado em anos (2016 e 2018), profundidades (0-30; 0-20 e 0-25 cm) e com equipamentos diferentes (Veris® 3100; ERM-02® e Terram®). A similaridade entre os mapas de variabilidade espacial foi determinada calculando-se o coeficiente de correlação de Pearson ($p < 0,01$). Todos os equipamentos estudados foram capazes de identificar a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo. Locais de elevada ou baixa condutividade elétrica apresentaram similaridade geográfica, independentemente do ano de mensuração, equipamento estudado ou profundidade de leitura. Foi observada elevada correlação entre os mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo, independentemente do ano de mensuração, equipamento estudado ou profundidade de leitura.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Variabilidade espacial. Zonas de manejo.

MAPPING OF THE APPARENT SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY BY DIFFERENT EQUIPMENT

ABSTRACT: From the mapping of the apparent electrical conductivity of the soil (CE) it is possible to characterize the spatial variability of a production field quickly and at low cost. Currently, on the market, there are equipment produced by different companies, which

measure the CE of the soil by different methods (electromagnetic induction and electrical resistivity) and at different depths. The present study aimed to quantify the similarity between spatial variability maps of the apparent electrical conductivity of the soil, measured by the electrical resistivity method, at different dates, depths and using different equipment. The work was carried out in the municipality of Cachoeira do Sul, state of Rio Grande do Sul, in a commercial area for the cultivation of grains, under no-tillage system under central pivot. The mapping of the apparent electrical conductivity of the soil was carried out in years (2016 and 2018), depths (0-30; 0-20 and 0-25 cm) and with different equipment (Veris® 3100; ERM-02® and Terram®). The similarity between the spatial variability maps was determined by calculating Pearson's correlation coefficient ($p < 0.01$). All the equipment studied was able to identify the spatial variability of the apparent electrical conductivity of the soil. Locations of high or low electrical conductivity showed geographic similarity, regardless of the year of measurement, equipment studied or depth of reading. A high correlation was observed between the spatial variability maps of the apparent electrical conductivity of the soil, regardless of the year of measurement, equipment studied or reading depth.

Key words: Precision agriculture. Spatial variability. Management zones.

INTRODUÇÃO

A difusão da tecnologia de informação na agricultura concretiza-se a cada nova safra através de mecanismos de monitoramento de solo e das plantas. Esse avanço tecnológico, combinado a princípios e práticas de manejo, como um conjunto, conceituam a agricultura de precisão (BERNARDI *et al.* 2015). Aliada à técnicas modernas de posicionamento por satélite, a agricultura de precisão possibilita o manejo localizado de fatores associados ao desempenho produtivo das culturas, atuando como ferramenta de gerenciamento, trazendo consigo resultados satisfatórios no que diz respeito à diminuição da expansão territorial e mitigação dos impactos ambientais, por promover a redução nos custos da produção, a redução de impactos ambientais gerados na produção agrícola e a dilatação da produtividade e qualidade das culturas (MACHADO *et al.* 2018).

O direcionamento dos olhares para a variabilidade do solo, simultaneamente, condicionou o estudo às suas variáveis (BERNARDI *et al.* 2015). O conhecimento do solo em todas as suas propriedades possibilita o planejamento e aperfeiçoamento das atividades sobre ele, resultando em economia e aumento de produção. A análise da composição e do comportamento do solo volta-se, basicamente, para sua caracterização física e química (MACHADO *et al.* 2018), estando a condutividade elétrica relacionada, de forma indireta, a estas características.

A mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CE) tem se mostrado uma ferramenta dentro da agricultura de precisão com alto potencial para auxiliar na identificação localizada dos fatores do solo que influenciam a produtividade das culturas. A CE do solo pode ser influenciada pela temperatura, teor de água, íons na solução, textura e estrutura do solo, assim, não é possível estimar valores de atributos do solo a partir de suas leituras, sejam eles químicos ou físicos (BOTTEGA *et al.* 2015).

Por ser um atributo de rápida determinação e de baixo custo de amostragem (SUDDUTH *et al.* 2013; LOPES *et al.* 2017), associado a relação com os atributos do solo que interferem na produtividade das culturas, o mapeamento da variabilidade espacial da CE destaca-se como parâmetro para definição de zonas de manejo (BERNARDI *et al.* 2015). Com a delimitação destas zonas, regiões do campo de produção com valores de CE semelhantes podem ser consideradas homogêneas para fins de manejo (BOTTEGA *et al.* 2015).

Atualmente, no mercado, existem equipamentos produzidos por diferentes empresas, que mensuram a CE do solo por diferentes métodos (indução eletromagnética e resistividade elétrica) e em diferentes profundidades. Diante do exposto, o presente estudo objetivou quantificar a similaridade entre mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo, mensurada pelo método da resistividade elétrica, em diferentes profundidades e utilizando diferentes equipamentos, em área de plantio direto consolidado, cultivada sob pivô central.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no município de Cachoeira do Sul, estado do Rio Grande do Sul, em uma área comercial de 25,8 ha, destinada ao cultivo de grãos em sistema de plantio direto, sob pivô central. O solo da região é classificado como Argissolo Vermelho (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2013). Amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, para caracterização textural do solo.

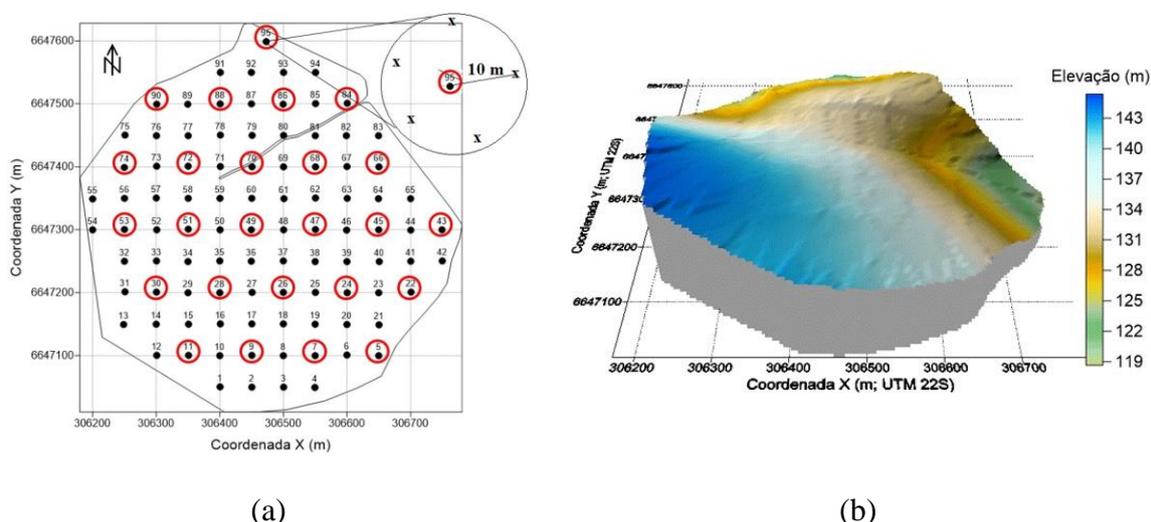


Figura 1. Grade amostral utilizada para mapeamento da CE (a) e modelo digital de elevação (b) da área de estudos. *Sample grid used to map the EC (a) and digital elevation model (b) of the study area.*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

Foi estabelecida uma malha amostral composta por 95 pontos, com espaçamento regular de 50 x 50 metros (Figura 1a), estes pontos serviram de base para coleta de dados de condutividade elétrica aparente do solo (CE, $mS\ m^{-1}$), altitude em relação ao nível do mar e

análises estatísticas e geoestatísticas subsequentes. Desta grade de 95 pontos, em 24 deles (circulados em vermelho) foram coletadas amostras de solo (0,0-0,20 m), para fins de caracterização granulométrica, sendo cada ponto representado por uma amostra composta por outras 5 amostras simples, coletadas a um raio de aproximadamente 10 metros do ponto (Figura 1a). Utilizou-se um receptor GPS da marca Garmin, modelo GPSMAP 62sc para localização dos pontos amostrais na área e obtenção do valor de altitude em relação ao nível do mar para construção do modelo digital de elevação da área de estudo (Figura 1b).

O mapeamento da CE (mS m^{-1}) foi realizado em profundidades e com equipamentos diferentes, conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Equipamentos, datas e profundidades de leituras da CE (mS m^{-1}). *EC measurement equipments, dates and depths.*

Equipamento	Fabricante	Profundidade de leitura (m)	Peso* (kg)	Velocidade (km h^{-1})	Data da Leitura
Veris® 3100	Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas	0,0 – 0,30 0,0 – 0,90**	Não informado no catálogo	12-20	04 nov. 2016
LandMapper ERM-02®	Landviser LLC	0,0 – 0,20	-	-	25 mai. 2018
Terram®	Falker Automação Agrícola LTDA	0,0 – 0,25	534,75	12	13 nov. 2018

Nota: *Com lastro. **Leituras não consideradas neste estudo. Fonte: Catálogo dos equipamentos. *Note: *With weight. ** Readings not considered in this study.*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*



Figura 2. Medidor comercial de condutividade elétrica do solo Veris® 3100, da Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas. *Commercial electrical conductivity meter Veris® 3100, Stara S/A company.*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

O Veris® 3100 (Figura 2) é constituído basicamente por um chassi onde são montados seis discos, de forma a obter leituras de condutividade elétrica das camadas de 0 – 30 e 0 – 90 cm de profundidade. Pesos são adicionados ao chassi para garantir o corte da palhada e o contato dos discos com o solo. As leituras são obtidas a partir da emissão de uma corrente

elétrica pelos dois discos intermediários, enquanto que os dois discos internos e os dois discos externos detectam a diferença de potencial que ocorre no campo eletromagnético gerado no solo e resultante da corrente elétrica aplicada. O par de discos internos integra a resistência entre as profundidades de 0 e 30 cm, enquanto o par de discos externos integra a resistência entre 0 e 90 cm (MACHADO *et al.* 2006; PERALTA *et al.* 2013). O equipamento foi tracionado pela área de estudo utilizando um trator.



Figura 3. Medidor comercial de condutividade elétrica do solo Terram® (a) e sistema Fieldbox (b), da Falker Automação Agrícola LTDA. *Commercial electrical conductivity meter Terram® (a) and Fieldbox system (b), Falker Agricultural Automation.*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

O Terram® (Figura 3a) é um equipamento constituído por um chassi onde são montados quatro discos igualmente espaçados em 0,25 metros. Pesos são adicionados ao chassi para garantir o corte da palhada e o contato dos discos com o solo. Os discos internos atuam como eletrodos potenciais e os externos como eletrodos de corrente. A condutividade elétrica do solo é obtida a partir do inverso da resistividade elétrica do solo mensurada pela diferença potencial entre a corrente emitida e aquela recebida. Os dados coletados foram gravados no sistema Fieldbox (Figura 3b), de fabricação da mesma empresa. O equipamento foi tracionado pela área de estudo utilizando um quadriciclo.

Na obtenção da condutividade elétrica aparente do solo, utilizando o medidor de condutividade elétrica portátil LandMapper ERM-02® (Figura 4), a configuração da montagem dos eletrodos utilizada foi a Matriz de Wenner (CORWIN; HEDRICKX, 2002; CORWIN; LESH, 2003). O suporte para os eletrodos foi construído utilizando tubos de metalon, parafusos de aço inoxidável e fios flexíveis em cores diferentes. Para eletrodos de corrente optou-se por utilizar fio vermelho e para os eletrodos de potencial, fio preto (Figura 4). O contato entre os parafusos de aço com o metalon foi isolado, revestindo os parafusos com mangueira de PVC (mangueira de nível). Após montada a estrutura, o isolamento dos eletrodos foi testado utilizando um multímetro digital da marca Fluke, modelo 15B+.

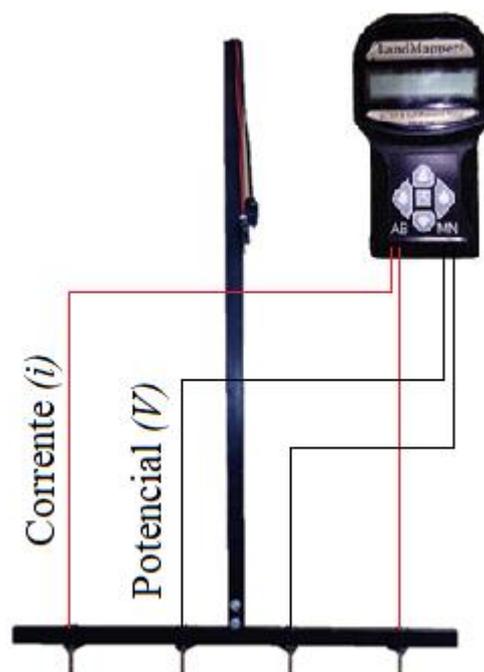


Figura 4. Medidor de condutividade elétrica portátil LandMapper ERM-02 e Matriz de Wenner. *LandMapper ERM-02 portable electrical conductivity meter and Wenner Matrix.*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

Foi efetuada a leitura da resistividade elétrica do solo nos 95 pontos amostrais (Figura 1a). 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.

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

Em que,

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

Em função do elevado volume de informação coletada pelos equipamentos Veris® 3100 e Terram®, inicialmente realizou-se uma filtragem dos dados, sendo removidos aqueles considerados discrepantes. Para identificação destes, foi utilizado método proposto de Libardi *et al.* (1996), segundo a qual o limite crítico para estes valores é definido a partir da dispersão interquartil (DQ), sendo o limite superior definido por (Q3 + 1,5 x DQ) e o inferior por (Q1 - 1,5 x DQ), em que Q1 e Q3 são o primeiro e o terceiro quartil, respectivamente.

Após a remoção dos valores discrepantes, realizou-se uma interpolação de valores para produção dos mapas de CE. O mapa de pontos amostrais (Figura 1a) foi sobreposto ao mapa interpolado, assim, foi possível extrair o valor de CE em cada um dos 95 pontos da grade amostral, de forma a obter um banco de dados contendo os valores de CE, medidos pelos diferentes equipamentos, em diferentes profundidades, no mesmo local geográfico (ponto amostral). Os valores de CE extraídos dos mapas interpolados advindos das leituras com os equipamentos Veris® 3100 e Terram®, juntamente com aqueles obtidos em leituras ponto-a-ponto com o equipamento LandMapper ERM-02®, constituíram o banco de dados utilizados na análise estatística descritiva e análise geoestatística.

Dos 95 pontos amostrais, 25 foram selecionados para serem utilizados na análise de correlação de Pearson ($p < 0,01$). Montgomery e Runger (2009) recomendam a utilização de não mais que 30 pontos em análises de correlação de Pearson, isso porque número de pontos utilizados na análise de correlação influencia de forma tendenciosa o teste de hipótese, sendo que quanto maior o número de pontos, maior a chance de rejeição da hipótese de nulidade.

A dependência espacial foi avaliada pelos ajustes de semivariogramas, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca, definida pela Equação 3.

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

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 teóricos de semivariogramas 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, 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).

Após a escolha do modelo, foram determinados os parâmetros: efeito pepita (C_0), contribuição da semivariância (C_1), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance (A). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado e classificado, segundo proposta de Cambardella *et al.* (1994), utilizando a Equação 4 e assumindo os seguintes intervalos: dependência espacial baixa para $IDE > 0,75$, moderada para $0,25 \leq IDE \leq 0,75$ e forte para $IDE < 0,25$.

$$IDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \quad (4)$$

Uma vez detectada a dependência espacial e ajustado o modelo teórico de semivariância, foi produzido o mapa de variabilidade do atributo. A interpolação dos mapas 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), ele assume que as médias locais não são necessariamente próximas da média da população usando-se os pontos vizinhos para a estimação. 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 estatística descritiva e de correlação de Pearson foi executada utilizando o programa computacional Statistica, versão 7. A análise da variabilidade espacial foi realizada utilizando o programa computacional GS+, versão 7. Os mapas temáticos de variabilidade espacial foram editados no programa computacional Surfer, versão 10.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo da área de estudo aprestou, em média, 460 g kg⁻¹ de areia, 20 g kg⁻¹ de silte e 340 g kg⁻¹ de argila, sendo classificado como de textura média (EMBRAPA, 2013). Os mapas de variabilidade espacial da granulometria do solo são apresentados na Figura 5.

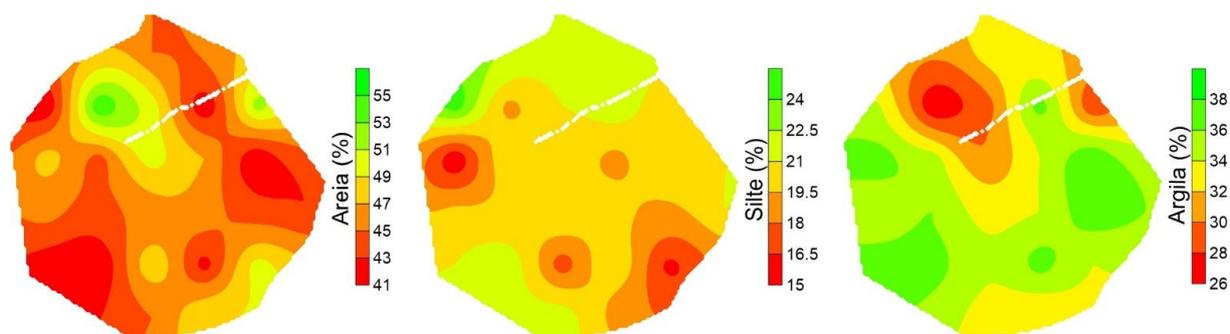


Figura 5. Mapas temáticos da variabilidade espacial da granulometria. *Thematic maps of soil granulometry spatial variability.*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

Tabela 2. Estatística descritiva para os valores de CE (mS m⁻¹) mensurados pelos diferentes equipamentos, em diferentes datas e profundidades. *Descriptive statistics for EC values (mS m⁻¹) measured by different equipment, at different dates and depths.*

Equipamentos	Média	Mínimo	Máximo	Variância	$\sigma^{(1)}$	CV(%)
Veris® 3100	52,49	43,62	58,43	17,71	4,21	8,02
Terram®	5,72	3,44	10,70	1,50	1,22	21,38
ERM-02	11,00	7,42	16,65	3,43	1,85	16,84

Nota: ¹Desvio padrão. *Note: ¹Standard deviation.*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

Na Tabela 2 é apresentado o resultado da análise estatística descritiva para os valores de CE mensurados por diferentes equipamentos, datas e profundidades. O maior valor médio de CE foi obtido para mensuração realizada utilizando o equipamento Veris® 3100, sendo

observado valor de 52,49 mS m⁻¹. Já o menor valor, foi observado para leituras com o equipamento Terram® (5,72 mS m⁻¹).

Estas variações nas leituras podem estar associadas com variações no teor de água do solo (RABELLO; BERNARDI; INAMASU, 2014), no momento das leituras com cada equipamento. O teor de matéria orgânica, pH e sais solúveis presentes na solução do solo (PERALTA *et al.* 2013; CORASSA *et al.* 2016) em função dos diferentes anos de manejo, podem ter sido, também, responsáveis pelas diferenças nos valores de leituras observados.

Além dos fatores citados, características técnicas de cada equipamento, como corrente elétrica aplicada nos eletrodos (variável *i*, Equação 1), também pode ter influenciado nos valores mensurados. É importante destacar que as variações nos valores de CE, observados nas leituras com os diferentes equipamentos, não são indicativas de que um equipamento é melhor ou pior que o outro, apenas que as leituras foram realizadas em condições de campo diferentes.

O ajuste de um modelo teórico de semivariância á semivariância empírica das variáveis (Tabela 3) permitiu a confecção de mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da CE mensurada pelos diferentes equipamentos. Todos os ajustes apresentaram coeficiente de determinação (R²) acima de 0,90, o que indica que o modelo ajustado descreveu, com elevada precisão, a variabilidade espacial da CE mensurada.

Tabela 3. Parâmetros de ajuste dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente à modelagem da dependência espacial da CE (mS m⁻¹) mensurada pelos três equipamentos estudados. *Parameters of the theoretical semivariograms and the cross-validation analysis related to the modeling of the spatial dependence of the EC (mS m⁻¹) measured by the three studied equipments.*

Equipamentos	Parâmetros de ajuste dos semivariogramas						
	Modelo	a ⁽¹⁾	C ₀ +C ⁽²⁾	C ₀ ⁽³⁾	IDE ⁽⁴⁾	SQR ⁽⁵⁾	R ²⁽⁶⁾
Veris® 3100	Gaussiano	332,40	86,12	33,7	Moderado	34,4	0,98
Terram®	Esférico	386,80	1,08	0,46	Forte	0,01	0,98
ERM-02	Esférico	280,60	2,77	1,33	Moderado	0,04	0,95
Parâmetros da análise de validação cruzada							
	Coeficiente de Regressão		Y ⁽⁷⁾	EPP ⁽⁸⁾		R ²	
Veris® 3100	0,92		4,31	6,52		0,25	
Terram®	0,94		0,33	0,79		0,32	
ERM-02	0,90		1,05	1,39		0,24	

Nota: ¹Alcance (m); ²Patamar; ³Efeito pepita; ⁴Índice de dependência espacial; ⁵Soma de quadrados do resíduo; ⁶Coeficiente de determinação; ⁷Intercepto; ⁸Erro padrão de predição. ¹Range (m); ²Sill; ³Nugget effect; ⁴Spatial dependency index; ⁵Sum of squares of the residue; ⁶Coefficient of determination; ⁷Intercept; ⁸Standard prediction error.

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

O valor do alcance, determinado pelo ajuste dos semivariogramas, foi, independente do atributo, no mínimo cinco vezes maior que a distância mínima entre pontos amostrais (50 metros). Este parâmetro indica a distância em que os pontos amostrados estão correlacionados

(RODRIGUES; CORÁ; FERNANDES, 2012; AQUINO *et al.* 2014). Sendo este valor maior que a distância de separação dos pontos amostrais, a estimativa de valores em locais não amostrados, utilizando interpolação pelo método da krigagem, produzirá mapas com baixo erro de predição (OLIVER; WEBSTER, 2014).

Outros indicativos da qualidade na estimativa de valores de CE em locais não amostrados, são os parâmetros obtidos na análise de validação cruzada (Tabela 2). Os coeficientes de regressão foram muito próximos ao valor 1 (valor ideal) e os valores para o erro padrão de predição (EPP), mostraram-se baixos, quando comparados aos valores médios de CE medidos por cada equipamento. Para leituras utilizando o Veris® 3100, o EPP representou 12,4% do valor médio, já para leituras realizadas utilizando o Terram®, a porcentagem do valor de EPP, em relação ao valor médio, foi de 13,3%. O menor valor percentual, do EPP em relação ao valor médio, foi observado para leituras utilizando o ERM-02®, representativo de 9,5%.

Na Figura 6 são apresentados os mapas de variabilidade espacial da CE, mensurada por diferentes equipamentos, em diferentes datas e profundidades.

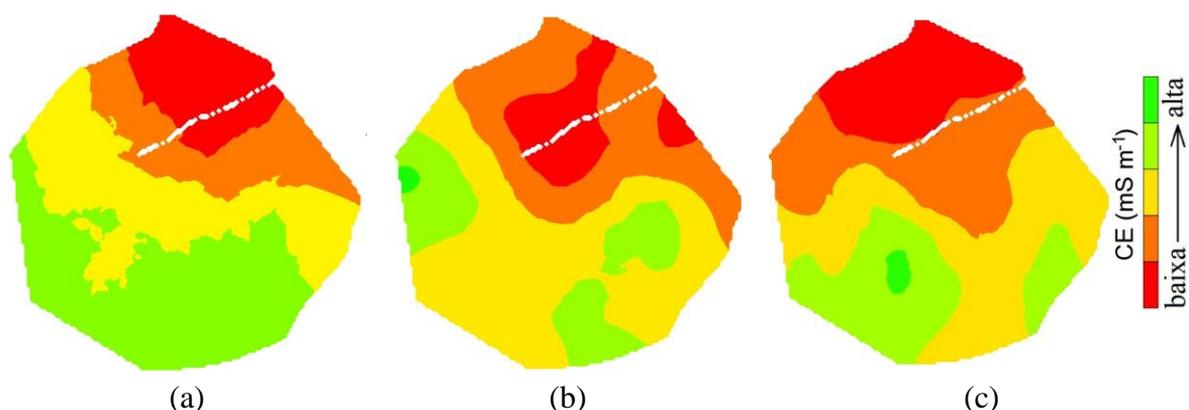


Figura 5. Mapas temáticos da variabilidade espacial da CE mensurada pelos diferentes equipamentos em diferentes datas: Veris® 3100 em 04 nov. 2016 (a); ERM-02 em 25 mai. 2018 (b) e Terram® em 13 nov. 2018 (c). *Thematic maps of the EC spatial variability measured by different equipment on different dates: Veris® 3100 on 04 Nov. 2016 (a); ERM-02 on May 25 2018 (b) and Terram® on Nov 13 2018 (c).*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

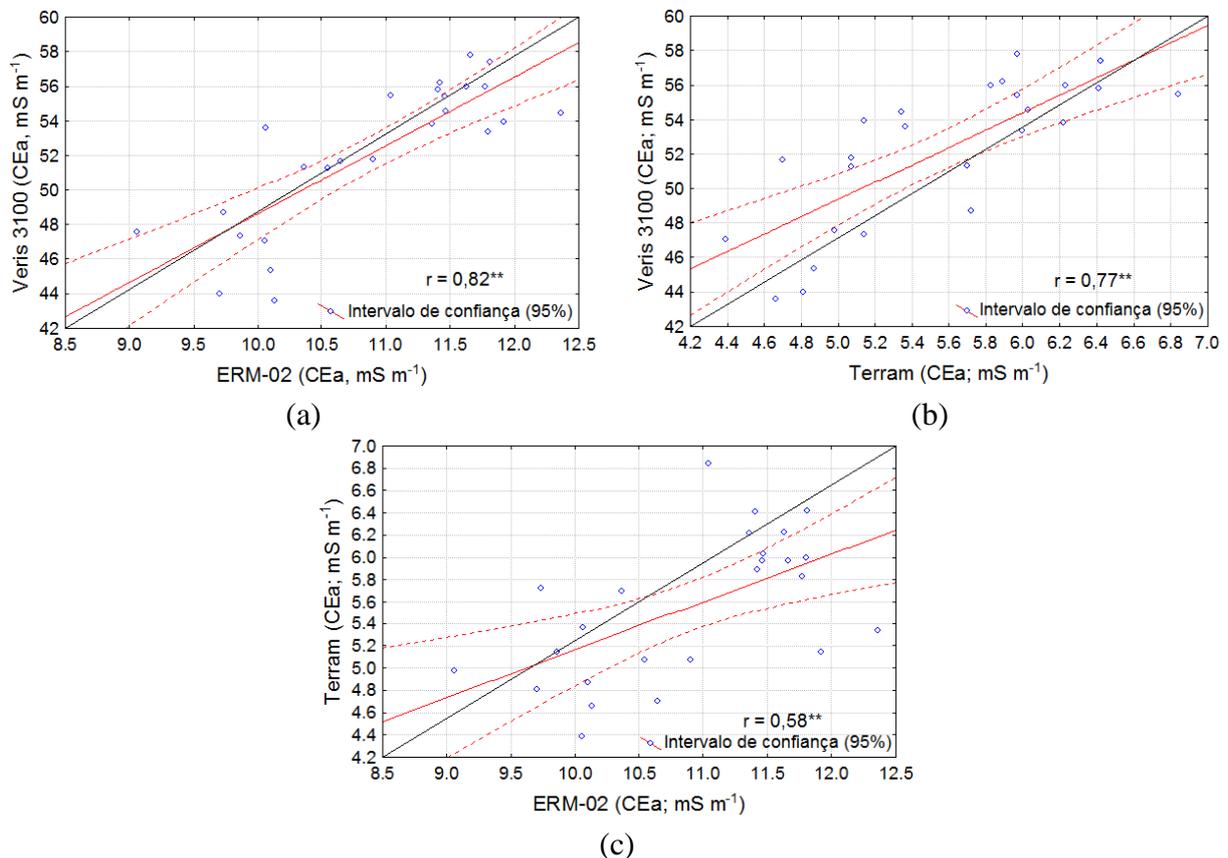
Independente do equipamento utilizado, da profundidade ou da data das leituras, visualmente nota-se a similaridade entre os mapas de variabilidade espacial da CE, sendo possível destacar regiões da área de estudo com maior e menor valor de condutividade elétrica. Embora os valores mínimos, médios e máximos observados para as leituras de CE obtida pelos diferentes equipamentos (Tabela 2), apresentaram diferenças, a localização espacial destes mostrou-se similar. Considerando que as leituras foram executadas em datas e profundidades diferentes e que o manejo da área alterou suas características químicas e biológicas, uma hipótese associada a similaridade observadas entre os mapas decorre do fato de que, neste tipo de solo, é possível que fatores com baixa variabilidade temporal, como a granulometria e a textura do solo, são os que mais influenciaram nas leituras de CE.

A CE é uma medida que integra textura e disponibilidade de água (RABELLO;

BERNARDI; INAMASU, 2014), sendo que seus valores estão relacionados com o teor de argila do solo e sua variabilidade espacial (MACHADO *et al.* 2006). Variações nos teores de argila podem explicar variações na capacidade de troca de cátions (CTC), no teor de umidade do solo, na disponibilidade de sais na solução do solo e na porcentagem de matéria orgânica, fatores estes, que influenciam a condução de corrente elétrica no solo (FORTES *et al.* 2015; SANCHES *et al.* 2018; PERALTA *et al.* 2013; CORASSA *et al.* 2016).

Estudos conduzidos por Araújo *et al.* (2016) observaram que os atributos K e CTC apresentaram elevada relação com a CE. Este fato pode ser explicado, pois, de acordo com Reis *et al.* (2009) a CTC indica a quantidade de íons positivos (cátions) que o solo é capaz de reter em determinadas condições e permutar por quantidades estequiométricas equivalentes de outros cátions, sendo função da intensidade de cargas negativas que se manifesta nos colóides (argila), o que justifica tal relação.

A correlação de Pearson entre as leituras de CE, para comparações entre todos os equipamentos, foi significativa a 1% de probabilidade (Figura 6).



**Correlação significativa ($p < 0,01$). ** *Significant correlation ($p < 0.01$).*

Figura 6. Gráficos de dispersão e correlação de Pearson (r) entre os valores de condutividade elétrica aparente do solo mensurados pelos diferentes equipamentos. *Pearson (r) dispersion and correlation graphs between the apparent electrical conductivity values of the soil measured by the different equipment.*

Fonte: Autoria própria. *Own authorship.*

Um fator importante de ser destacado, com base nos mapas de variabilidade espacial da CE (Figura 5) e nos resultados obtidos pela análise de correlação de Pearson, é que a

delimitação de zonas de manejo, independente do equipamento utilizado na mensuração da CE, produziria um mapa de zonas bastante semelhante. O interesse prático no monitoramento da CE consiste em identificar áreas com características similares, para que se possa aplicar um mesmo manejo (SERRANO; SHAHIDIAN; SILVA, 2017), ou ainda, adequar as práticas de cultivo associadas a cada cultura (MIQUELONI; GIANELLO; BUENO, 2015), como a adubação em taxa variável, a partir da delimitação de sítios específicos de manejo (LEAL *et al.* 2015).

De acordo com Cherubin *et al.* (2014), vários estudos demonstraram como a variabilidade espacial depende de fatores do solo, como tipo ou atributo em estudo. Desta forma, o mapeamento da CE (Figura 5) poderia servir como base para o planejamento da coleta de amostras de solo, visando a caracterização química e posterior recomendação das dosagens de corretivos e fertilizantes, ou seja, buscando caracterizar aquelas regiões de CE alta (regiões em verde e amarelo) e baixa (regiões em laranja e vermelho). Com isso seria possível otimizar o tempo e o custo com amostragem e análise laboratorial.

A questão do direcionamento de amostragem de solo necessita avançar, uma vez que, a utilização de grades amostrais para caracterização química, além de mais cara e laboriosa, pode não fornecer informações precisas, haja vista a necessidade de uma grande quantidade de pontos para detectar a variabilidade espacial de alguns atributos. Neste sentido, o uso de sensores pode ajudar a delimitar regiões (ou zonas de manejo) e, com base nesses limites, estabelecer pontos de amostragem mais direcionados (BERNARDI *et al.* 2015). Considerando o mapeamento da variabilidade espacial da CE, Bottega *et al.* (2019) destacam que os atributos químicos e físicos do solo, que causam variações na CE, são também responsáveis por variações na produtividade das culturas, demonstrando ser promissora a utilização da CE do solo como fator delimitador de zonas de manejo.

O presente estudo demonstrou que, independentemente do equipamento utilizado no mapeamento da variabilidade espacial da CE, todos foram capazes de detectá-la e mapear os locais de maior e menor valor, sendo observada elevada correlação entre os mapas de variabilidade espacial produzidos. Esta informação é importante para empresas prestadoras de serviço em AP e produtores rurais, pois demonstra que a CE, embora pouco utilizada atualmente, é um atributo do solo com potencial para auxiliar na tomada de decisão quanto ao manejo a ser adotado nos locais onde sua variação é detectada. Demais estudos abordando o emprego da CE no manejo do solo devem ser conduzidos, para assim validar sua promissora utilização em aplicações de agricultura de precisão.

CONCLUSÃO

Todos os equipamentos estudados foram capazes de identificar a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo.

Locais de elevada e/ou baixa condutividade elétrica apresentaram similaridade geográfica, independentemente do ano de mensuração, equipamento estudado ou profundidade de leitura.

Foi observada elevada correlação entre os mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo, independentemente do ano de mensuração, equipamento estudado ou profundidade de leitura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de Bolsa de Produtividade em Pesquisa, à ConnectFarm LTDA pela disponibilização dos dados de leitura do Veris® 3100, bem como apoio logístico e técnico; à Falker Automação Agrícola LTDA pela disponibilização do equipamento Terram® e apoio técnico durante as leituras em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A. de; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geostatistics in assessment of physical properties in a latossolo (oxisol) under native forest and grassland in Manicoré, Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p.397-406, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200004>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ARAÚJO, E. G.; CORRÊA, A. R.; LIMA, D. C. O. S.; PRANDO, E. P.; SENA, K. N., MONTANARI, R.; SILVA, R. M. da. Análise espacial da condutividade elétrica e atributos físico-químicos de um Latossolo. **Agrarian**, Dourados, v. 9, n. 31, p.73-83, 2016. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/4028>. Acesso em: 12 nov. 2020.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p.205-221, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23314>. Acesso em: 12 nov. 2020.

BOTTEGA, E. L.; DIAS, R. F.; SARI, E. L.; DORNELES, A. B.; MARIN, C. K.; OLIVEIRA, Z. B. de. Zonas de manejo: a teoria na prática. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 171, p.11-14, 2019. Disponível em: https://www.falker.com.br/artigos/Zonas-de-manejo_a-teoria-na-pratica_Rev-Plantio-Direto_Eduardo-Bottega-UFSM.pdf. Acesso em: 15 nov. 2020.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 6, n. 2, p.134-142, 2015. Disponível em: <https://www.comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/354>. Acesso em: 10 nov. 2020.

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

Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>. Acesso em: 14 nov. 2020.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; MENEGOL, D. R.; DA ROS, C. O.; PIAS, O. H. C.; BERGHETTI, J. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p.425-432, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300007>. Acesso em: 14 nov. 2020.

CORASSA, G. M.; AMADO, T. J. C.; TABALDI, F. M.; SCHWALBERT, R. A.; REIMCHE, G. B.; DALLA NORA, D.; ALBA, P. J.; HORBE, T. A. N. Espacialização em alta resolução de atributos da acidez de Latossolo por meio de sensoriamento em tempo real. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p.1306–1316, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900030>. Acesso em: 14 nov. 2020.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 3, p.471-471. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2003.4550>. Acesso em: 17 nov. 2020.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA.. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 2013. 353 p.

FORTES, R.; MILLÁN, S.; PRIETO, M. H.; CAMPILLO, C. A methodology based on apparent electrical conductivity and guided soil samples to improve irrigation zoning. **Precision Agriculture**, New York, v. 16, n. 4, p. 441–454, 30 ago. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9388-7>. Acesso em: 17 nov. 2020.

LEAL, A. J. F.; MIGUEL, E. P.; BAIIO, F. H. R.; NEVES, D. C.; LEAL, U. A. S. Redes neurais artificiais na predição da produtividade de milho e definição de sítios de manejo diferenciado. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 4, p.436-444, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0140>. Acesso em: 15 nov. 2020.

LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, n. 1, p. 1-12, 1996.

LOPES, K. A. L.; AGUIAR, F. I. S.; OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; SILVA, G. B. Variabilidade espacial da condutividade elétrica de um solo coeso relacionada com argila. **Unimar Ciências**, Marília, v. 26, n. 1-2, p.54-63, 2017. Disponível em: <http://ojs.unimar.br/index.php/ciencias/article/view/514>. Acesso em: 18 nov. 2020.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MEDARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio

direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p.1023-1031, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000600019>. Acesso em: 12 nov. 2020.

MACHADO, J.; PADILHA, M. R. F.; LIRA, F. P.; OLIVEIRA, J. G.; SILVA, R. S.; CAETANO, M. B. C. Agricultura de precisão e abertura de novas fronteiras no Brasil. **Geama**, Recife, v. 4, n. 1, p.45-53. 2018. Disponível em: <http://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/1764>. Acesso em: 17 nov. 2020.

MIQUELONI, D. P.; GIANELLO, E. M.; BUENO, C. R. P. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p.18-28, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4528029>. Acesso em: 14 nov. 2020.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 493 p.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, Amsterdam, v. 113, p.56-69, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>. Acesso em: 16 nov. 2020.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M.; ANGELINI, H. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 93, n. 2, p.205–218, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/cjss2012-022>. Acesso em: 14 nov. 2020.

RABELLO, L. M.; BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Condutividade elétrica aparente do solo. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R.Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 48-57. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1002959/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar>. Acesso em: 16 nov. 2020.

REIS, L. R.; VIEIRA, L. B.; MANTOVANI, E. C.; SANTOS, N. T.; QUEIROZ, D. M. Estudo da correlação da condutividade elétrica em um Latossolo Amarelo Escuro com propriedades químicas do solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 3, p.227–232, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.13083/reveng.v17i3.40>. Acesso em: 16 nov. 2020.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Spatial relationships between soil attributes and corn yield in no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 6, n. 2, p.599-609, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200029>. Acesso em: 14 nov. 2020.

SANCHES, G. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; REMACRE, A. Z.; FRANCO, H. C. J. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, p.217–225, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.010>. Acesso em: 18 nov. 2020.

SERRANO, J. M.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. Spatial variability and temporal stability

of apparent soil electrical conductivity in a Mediterranean pasture. **Precision Agriculture**, New York, n. 18, p.245–263, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9460-y>. Acesso em: 16 nov. 2020.

SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T. Modeling soil electrical conductivity-depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors. **Geoderma**, Amsterdam, v. 199, p.12–21, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.006>. Acesso em: 15 nov. 2020.