

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

FERNANDO FERREIRA LIMA DOS SANTOS

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO DETERMINADA
PELO MÉTODO DA RESISTIVIDADE UTILIZANDO DIFERENTES
FREQUÊNCIAS**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

FERNANDO FERREIRA LIMA DOS SANTOS

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO DETERMINADA
PELO MÉTODO DA RESISTIVIDADE UTILIZANDO DIFERENTES
FREQUÊNCIAS**

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*.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz

Coorientadores:

Domingos Sárvio Magalhães Valente

Nerilson Terra Santos

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237c Santos, Fernando Ferreira Lima dos, 1992-
2020 Condutividade elétrica aparente do solo determinada pelo
método da resistividade utilizando diferentes frequências /
Fernando Ferreira Lima dos Santos. – Viçosa, MG, 2020.
64 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Daniel Marcal de Queiroz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Condutividade elétrica.
3. Resistividade. 4. Eletrodos. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

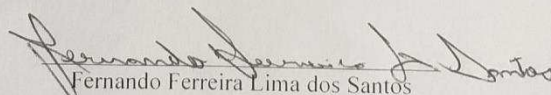
FERNANDO FERREIRA LIMA DOS SANTOS

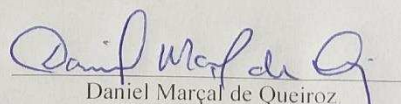
**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO DETERMINADA
PELO MÉTODO DA RESISTIVIDADE UTILIZANDO DIFERENTES
FREQUÊNCIAS**

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: 17 de agosto de 2020.

Assentimento:


Fernando Ferreira Lima dos Santos
Autor


Daniel Marçal de Queiroz
Orientador

Aos meus pais José Edmilson dos Santos e Rosimére Ferreira Lima dos Santos,
pelo exemplo de vida, incentivo, amor e confiança... Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades ao longo dessa jornada.

Aos meus pais José Edmilson dos Santos e Rosimére Ferreira Lima dos Santos, e meu irmão Lucas Ferreira Lima dos Santos pelo carinho e apoio em todas as decisões tomadas.

A minha namorada Flávia, pelo amor, carinho e companheirismo em todos os momentos durante essa caminhada.

A Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e financiamento da pesquisa.

Ao professor Daniel Marçal de Queiroz, pela oportunidade, confiança e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Nerilson Terra Santos e Domingos Sárvio Magalhães Valente pelas contribuições e orientações, sendo imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do laboratório de mecanização agrícola (LMA) Lucas, Samira, Guilherme, Rodrigo, Jorge, Vinicius, Amélia, Emanuel, Marcelo e André pela amizade e companheirismo.

Aos meus amigos de república Alex, Caio, Felipe e Lucas e minha amiga de longa data Leticia por todo o companheirismo e amizade ao longo desses anos.

A todos que, de forma direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto.

Muito obrigado!

“A ciência é o grande antídoto contra o veneno do entusiasmo e da
superstição”.
(Adam Smith)

RESUMO

SANTOS, Fernando Ferreira Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2020. **Condutividade elétrica aparente do solo determinada pelo método da resistividade utilizando diferentes frequências.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente e Nerilson Terra Santos.

A condutividade elétrica aparente do solo (CE_a), determinada pelo método da resistividade elétrica (RE), é um dos atributos mais utilizados para caracterizar o solo na agricultura de precisão. Este atributo é comumente utilizado para delimitar áreas que apresentam solos de características similares. Para determinar a CE_a , aplica-se uma corrente elétrica alternada de baixa frequência no solo e determina-se a diferença de potencial em dois pontos pré-estabelecidos, diferença essa resultante da aplicação da corrente elétrica. Embora seja um método muito usado, ainda há incerteza sobre a faixa de frequência ideal a ser utilizada e sobre a influência da frequência do sinal do sensor nos valores obtidos pelo sensor. Dessa forma, esse trabalho teve como objetivos avaliar se a frequência da corrente elétrica influencia o valor da CE_a , obtida pelos sensores que utilizam o método da RE, e avaliar se existe uma faixa ideal de frequência da corrente elétrica do sensor, no qual a CE_a melhor se correlaciona com os atributos químicos e físicos do solo de interesse agrônomo. Para isso, um sensor portátil com opção de variar a frequência da corrente elétrica aplicada ao solo e que utiliza o computador de placa única BeagleBone Black, foi utilizado para medir a CE_a do solo. Determinações de CE_a foram realizadas em quatro áreas experimentais, utilizando-se seis diferentes frequências de corrente elétrica: 1, 5, 10, 20, 30 e 40 Hz. Para o primeiro objetivo, foram realizadas regressões lineares entre as frequências do sinal de corrente elétrica em estudo e o valor obtido pelo sensor, seguido pelo teste F ($p \leq 0,05$). Para o segundo objetivo, foram realizadas amostragens de solo em cinco pontos em cada uma das quatro áreas experimentais. Em seguida, correlações de Pearson ($p \leq 0,05$) foram calculadas, de forma a quantificar as correlações entre CE_a e os atributos físicos e químicos do solo, para cada frequência do sinal de corrente elétrica do sensor. Com base no número de correlações significativas encontradas para cada frequência, a homogeneidade foi analisada pelo teste de qui-quadrado ($p \leq 0,05$). O presente estudo apontou que, à exceção de dois pontos experimentais, o sinal de frequência de um

sensor CE_a não interfere no valor obtido por ele. Além disso, na faixa de frequência utilizada não se identificou uma faixa em que a condutividade elétrica aparente do solo estivesse mais correlacionada com os atributos químicos e físicos do solo de interesse agrônômico, uma vez que todas as frequências utilizadas apresentaram resultados semelhantes de CE_a . Entre nove e onze correlações significativas foram observadas entre os atributos químicos e físicos e a CE_a do solo, para as diferentes frequências de corrente elétrica testadas. No entanto, não foi observada relação entre o número de correlações significativas e as diferentes frequências.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Método da resistividade elétrica. Arranjo de Wenner

ABSTRACT

SANTOS, Fernando Ferreira Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2020. **Apparent soil electrical conductivity measured by the resistivity method using different frequencies.** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co-advisers: Domingos Sárvio Magalhães Valente and Nerilson Terra Santos.

The apparent soil electrical conductivity (EC_a) measured by the electrical resistivity method (ER) is one of the most used attributes to characterize soil in precision agriculture. This soil attribute is commonly used to delimit areas that have soils of similar characteristics. To measure EC_a , a low-frequency alternating electric current is applied to the soil and the electrical potential difference is measured at two predefined points. This potential difference is resultant from the application of electric current. Even though the EC_a is a very common way of characterizing the soil variability, there is still uncertainty about the ideal frequency range to be used and about the influence of the sensor signal frequency on the measured values by the sensor. Thus, the objective of this work was to assess whether the frequency of the electric current influences EC_a value, obtained by sensors that use the ER method, and to evaluate whether there is an ideal frequency range for the sensor's electric current, in which the EC_a best correlates with the soil chemical and physical attributes of agronomic interest. For this, a portable EC_a sensor where the frequency of the electrical current can be set by user was used to measure the soil EC_a . This sensor was built using the single board computer BeagleBone Black. EC_a measurements were performed in four experimental areas, using six different frequencies of electric current: 1, 5, 10, 20, 30 and 40 Hz. For the first objective, linear regressions were performed between the frequencies of the electric current signal under study and the value measured by the sensor, followed by the F test ($p \leq 0.05$). For the second objective, soil sampling was carried out at five points in each of the four experimental areas. Then, Pearson's correlations ($p \leq 0.05$) were calculated to quantify the correlations between EC_a and the physical and chemical attributes of the soil, for each frequency of the electric current signal used in the sensor. Based on the number of significant correlations found for each frequency, homogeneity was analyzed using the chi-square test ($p \leq 0.05$). The present study pinpointed that, apart from two experimental points, the frequency signal of an EC_a sensor does not interfere with the value obtained by it. In addition, in the frequency

range used, a range was not identified in which the soil apparent electrical conductivity was more correlated with the chemical and physical attributes of the soil of agronomic interest, since all used frequencies presented similar results of EC_a . Between nine and eleven significant correlations were observed between EC_a and the soils attributes, for different frequencies of electric current. However, there was no relationship between the number of significant correlations and the different frequencies used in the sensor.

Keywords: Precision agriculture. Electrical resistivity method. Wenner array

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.2	DISPOSIÇÃO DO TRABALHO	13
1.3	REFERÊNCIAS	14
2	O USO DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO NA AGRICULTURA: UMA REVISÃO DA LITERATURA	16
	RESUMO.....	16
	ABSTRACT.....	17
2.1	INTRODUÇÃO.....	18
2.2	TEORIA E PRINCÍPIOS BÁSICOS	19
2.3	UM BREVE HISTÓRICO DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NA AGRICULTURA	24
2.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NA AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	26
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
2.6	REFERÊNCIAS	30
3	ANÁLISE DE DIFERENTES FREQUÊNCIAS DA CORRENTE ELÉTRICA NA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO	36
	RESUMO.....	36
	ABSTRACT.....	37
3.1	INTRODUÇÃO.....	38
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3.2.1	Áreas experimentais	40
3.2.2	Determinação da condutividade elétrica aparente do solo	41
3.2.3	Coleta de dados	42
3.2.4	Análises estatísticas.....	45
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
3.3.1	Avaliação da influência da frequência nos valores de CE_a	45
3.3.2	Avaliação da correlação entre CE_a e atributos físicos e químicos do solo para diferentes frequências.....	51
3.3.3	Homogeneidade da relação entre a frequência da corrente elétrica e as propriedades do solo	55
3.4	CONCLUSÃO.....	56

3.5	REFERÊNCIAS	58
4	CONCLUSÃO GERAL.....	64

1 INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura de precisão utiliza ferramentas e tecnologias que aplicam tratamentos que variam de local para local nos campos de produção, visando à maximização do retorno financeiro por unidade de área e otimização do uso de insumos (JAWAD et al., 2017; KHANAL et al., 2017). Geralmente a utilização de técnicas de agricultura de precisão levam à redução dos custos de produção, essa redução é variável dependendo das condições locais e das tecnologias empregadas. Redução de custo de produção variando entre 33 e 62 dólares por hectare pode ser atingida quando se adota agricultura de precisão (SCHIMMELPFENNIG; EBEL, 2016). Entretanto, para se ter sucesso na aplicação da agricultura de precisão é importante ter uma boa caracterização da variabilidade espacial das características do solo.

A metodologia tradicional de amostragem do solo em malha seguida de análise em laboratório é um procedimento caro e trabalhoso. Em geral, uma boa representação de qualquer característica do solo demanda uma densidade amostral elevada, dificultando a adoção da agricultura de precisão (ADAMCHUK et al., 2004; MORAL et al., 2010; QUEIROZ et al., 2017). Uma das alternativas para redução desse problema é a utilização de sensores que utilizam o método da resistividade elétrica para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a). Esse método permite a obtenção de mapas com elevada resolução espacial de forma rápida e a um baixo custo. A condutividade elétrica aparente do solo geralmente está correlacionada com atributos físicos e químicos do solo (ALLRED et al., 2008; SAMOUËLIAN et al., 2004).

A condução de eletricidade pelo solo se deve à presença de sais na solução do solo e íons trocáveis nas superfícies de partículas sólidas (ALLRED et al., 2008). Por meio de circuitos elétricos próprios, sensores que operam pelo método da resistividade elétrica determinam a capacidade do volume do solo em estudo de se opor ao fluxo de elétrons gerado pelo sensor (ALLRED et al., 2008; SAMOUËLIAN et al., 2004). Neste sentido, estes sensores são capazes de detectar a variabilidade espacial das condições do solo.

O mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo pelo método da resistividade elétrica é uma das técnicas mais confiáveis para caracterizar o padrão espacial das propriedades do solo em campo (SERRANO et al., 2014). Esta técnica é

utilizada em diversas aplicações, incluindo avaliação da qualidade do solo (CORWIN et al., 2003; JOHNSON et al., 2001), avaliação de mudanças no solo induzidas por ações antrópicas (URIBEETXEBARRIA et al., 2018), definição de zonas de manejo (BOTTEGA et al., 2017; VALENTE et al., 2012), modelagem de transporte de solutos no solo (CORWIN et al., 1999) e mapeamento de atributos do solo (ALLRED et al., 2008).

Para os sensores de condutividade elétrica aparente dos solos que utilizam o método da resistividade elétrica, a obtenção de dados confiáveis está relacionada com diversos fatores, como as características topográficas e físicas do solo (ALLRED et al., 2008; CORWIN; LESCH, 2005; COSTA et al., 2014), o material dos eletrodos do sensor e a fonte de energia do dispositivo (TELFORD et al., 1990; HERMAN, 2001; ALLRED et al., 2008). Um dos problemas relacionados ao uso dessa técnica é a formação de potenciais elétricos indesejáveis, devido à polarização dos eletrodos causado pelo contato entre o metal do eletrodo e a solução eletrolítica aquosa do solo. Para reduzir o efeito desse fenômeno, os sensores de condutividade elétrica aparente do solo devem aplicar uma corrente elétrica alternada, na faixa de frequência inferior a 100 Hz (TELFORD et al., 1990; HERMAN, 2001; ALLRED et al., 2008). Entretanto, ainda não está claro se existe influência da frequência da corrente elétrica nos valores obtidos pelo sensor e se existe uma faixa de frequência ideal a ser utilizada para as determinações.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho foi realizado com os seguintes objetivos:

- I. Avaliar se a frequência da corrente elétrica do sensor influencia o valor de CE_a do solo obtidos pelos sensores que utilizam o método da resistividade elétrica;
- II. Avaliar se existe uma faixa ideal de frequência da corrente elétrica do sensor, no qual a CE_a melhor se correlaciona com os atributos químicos e físicos do solo de interesse agrônomo.

1.2 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO

Essa dissertação foi estruturada em dois artigos. O primeiro artigo teve como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre o método de determinação da condutividade elétrica do solo por resistividade elétrica na agricultura. Dessa forma o leitor pode ter um entendimento sobre a teoria e os princípios básicos de

funcionamento de sensores que trabalham segundo esse método e seus principais arranjos, conhecer o histórico da utilização deste método na agricultura incluindo o seu uso na agricultura de precisão. No segundo artigo apresenta-se a avaliação do efeito da frequência da corrente elétrica na determinação da condutividade elétrica aparente do solo. Procurou-se avaliar também se existe correlação entre a faixa de frequência da corrente elétrica e os atributos químicos e físicos do solo de interesse agrônômico.

1.3 REFERÊNCIAS

- ADAMCHUK, V. I. et al. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71–91, 2004.
- ALLRED, B. J.; DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R. **Handbook of agricultural geophysics**. Boca Raton, FL - USA: CRC Press, 2008.
- BOTTEGA, E. L. et al. Precision agriculture applied to soybean: Part I - Delineation of management zones. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 5, p. 573–579, 2017.
- CORWIN, D. L. et al. Evaluation of a GIS-Linked Model of Salt Loading to Groundwater. **Journal of Environmental Quality**, v. 28, n. 2, p. 471–480, 1999.
- CORWIN, D. L. et al. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. **Geoderma**, v. 114, n. 3–4, p. 231–259, 2003.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1- 3 SPEC. ISS., p. 11–43, 2005.
- COSTA, M. M. et al. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 395, 2014.
- HERMAN, R. An introduction to electrical resistivity in geophysics. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 9, p. 943–952, 2001.
- JAWAD, H. M. et al. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 8, 2017.

JOHNSON, C. K. et al. Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil Condition. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 6, p. 1829–1837, 2001.

KHANAL, S.; FULTON, J.; SHEARER, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 22–32, 2017.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. DA. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335–343, 2010.

QUEIROZ, D. M. et al. Development and test of a low cost portable soil apparent electrical conductivity sensor using a Beaglebone Black. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, p. 1–10, 2017.

SAMOUËLIAN, A. et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2004.

SCHIMMELPFENNIG, D.; EBEL, R. Sequential Adoption and Cost Savings from Precision Agriculture. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 41, n. 1, p. 97–115, 2016.

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. Spatial and temporal patterns of apparent electrical conductivity: Dualem vs. Veris sensors for monitoring soil properties. **Sensors**, v. 14, n. 6, p. 10024–10041, 2014.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.

URIBEETXEBARRIA, A. et al. Spatial variability in orchards after land transformation: Consequences for precision agriculture practices. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 343–352, 2018.

VALENTE, D. S. M. et al. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 3, p. 173–179, 2012.

2 O USO DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO NA AGRICULTURA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

RESUMO

A agricultura de precisão é um conjunto de técnicas utilizadas pelo produtor rural que podem ter diferentes objetivos. Ela pode ser usada visando ao aumento da lucratividade da produção agrícola, à redução dos impactos ao meio ambiente e/ou à melhoria da qualidade do produto. Para isso, informações precisas sobre a variabilidade espaço-temporal dos atributos do solo são importantes para o manejo sustentável da propriedade agrícola. Neste sentido, a determinação da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) por meio de sensores que operam pelo método da resistividade elétrica (RE) tem sido bastante utilizada devido à forte correlação entre a CE_a e os diferentes atributos químicos e físicos do solo. Esta revisão de literatura tem como objetivos abordar a teoria e os princípios básicos de funcionamento de sensores de CE_a que operam pelo método da RE e seus principais arranjos, apresentar um histórico sobre o uso desse método na agricultura e relatar aplicações destes sensores na agricultura de precisão. Esta revisão revelou que o uso de sensores de CE_a que operam pelo método da RE são utilizados com sucesso em diversas aplicações na agricultura. Devido à sua simplicidade, rapidez, baixo custo e confiabilidade na medição, esse método é um dos mais populares para a caracterização dos atributos do solo na agricultura de precisão. O uso combinado deste método com o sensoriamento remoto tem-se mostrado promissor, visto que estas técnicas fornecem informações complementares para o manejo localizado das culturas. O desenvolvimento de sensores de CE_a mais sofisticados vem mostrando grande potencial para otimizar o tempo de coleta e a qualidade dos dados. Sensores de múltiplos canais e eletrodos controlados por computador vêm possibilitando uma redução significativa no tempo de coleta de dados. Já os sensores de múltiplas frequências demonstram potencial para a aquisição de dados com melhor qualidade.

Palavras-chave: Condutividade elétrica aparente do solo, agricultura de precisão, sensores de solo

ABSTRACT

Precision agriculture is a set of techniques used by farmers that can have different objectives. It can be used to increase the profitability of crop production, to reduce impacts on the environment and/or to improve product quality. To achieve these objectives, accurate information on the spatio-temporal variability of the soil's attributes is important for the sustainable management of the agricultural fields. Therefore, the determination of the soil apparent electrical conductivity (EC_a) using sensors that operate by the electrical resistivity (ER) method has been widely used due to the strong correlation between EC_a and the different chemical and physical soil attributes. The objective of this literature review are to present the theory and basic operating principles of EC_a sensors that operate by the ER method and its main arrays, to overview the history about the use of this method in agriculture and to show the application of these sensors in precision agriculture. This review revealed that the use of EC_a sensors that operate by the ER method are successfully used in several applications in agriculture. Due to its simplicity, speed, low cost and reliability in measurement, this method is one of the most popular for the characterization of soil attributes in precision agriculture. The combination of this method with remote sensing has been promising since these techniques provide complementary information for the precision management of the crops. The development of more sophisticated EC_a sensors has shown great potential to optimize data collection time and data quality. Sensors with multiple-channel and electrodes computer-controlled have been developed to significantly reduce data acquisition time. Multi-frequency sensors, on the other hand, have demonstrated the potential for the acquisition of better-quality data.

Key words: Apparent soil electrical conductivity, precision agriculture, soil sensors

2.1 INTRODUÇÃO

O sistema tradicional de manejo de propriedades agrícolas dificilmente consegue obter a eficiência ideal, tanto em termos econômicos quanto em produtividade. Isso se deve ao fato de a aplicação de insumos agrícolas nesse sistema ser feita de maneira uniforme para toda a área, ignorando a variabilidade espacial das características do solo (TEY; BRINDAL, 2012). Isso resulta num manejo de menor eficiência, que reduz o retorno financeiro que os agricultores poderiam obter e que aumenta impacto ambiental provocado pela agricultura (LINDBLOM et al., 2017). Portanto, o conhecimento da variabilidade espaço-temporal dos atributos do solo é essencial para o manejo sustentável da propriedade agrícola.

A agricultura de precisão permite aplicar um tratamento localizado ao solo, reduzindo o desperdício de insumos e otimizando o retorno financeiro (JAWAD et al., 2017). No entanto, a obtenção de resultados ideais está diretamente relacionada à precisão e eficiência dos métodos utilizados para a determinação dos atributos do solo (GE et al., 2011). Dentre estes métodos, a medição da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) por meio de sensores que operam pelo método da resistividade elétrica (RE) tem sido bastante utilizada devido à sua simplicidade, rapidez, confiabilidade na medição e baixo custo (ALLRED et al., 2008; RADIOGLOU-GRAMMATIKIS et al., 2020). Além disso, diversos atributos químicos e físicos do solo são fortemente correlacionados com as propriedades geoelétricas do solo, tornando o uso destes sensores bastante promissor para a agricultura de precisão (SAMOUËLIAN et al., 2004).

A condução da eletricidade no solo se deve à presença de sais livres na solução do solo e íons trocáveis nas superfícies de partículas sólidas (ALLRED et al., 2008). Neste sentido, sensores de CE_a que operam pelo método da RE são capazes de detectar alterações em diversos atributos do solo de interesse agrônomo, como o teor de água no solo (KURTULUŞ et al., 2019; TSOULIAS et al., 2018), textura do solo (FORTES et al., 2015; MEDEIROS et al., 2018; SERRANO et al., 2014; SUDDUTH et al., 2017), matéria orgânica (GUPTA et al., 2019; SERRANO et al., 2014), pH (SANA et al., 2014; SERRANO et al., 2014; TERRÓN et al., 2011) e teores de cálcio (TERRÓN et al., 2011), fósforo (BOTTEGA et al., 2015; MEDEIROS et al., 2018; SERRANO et al., 2014; VALENTE et al., 2012a), potássio (VALENTE et al., 2014) e alguns micronutrientes do solo (BOTTEGA et al., 2015; VALENTE et al., 2014).

Esta revisão de literatura tem como objetivos prover o leitor (i) um entendimento sobre a teoria e os princípios básicos de funcionamento de sensores de CE_a que operam pelo método da RE e seus principais arranjos, (ii) um resumo do histórico deste método na agricultura e (iii) um resumo da aplicação destes sensores na agricultura de precisão.

2.2 TEORIA E PRINCÍPIOS BÁSICOS

O método da resistividade elétrica (RE), basicamente, tem como finalidade determinar a capacidade do material em estudo de se opor ao fluxo de elétrons gerado pelo sensor. Esse método tem por base a Lei de Ohm, segundo a qual, a relação entre corrente elétrica I é aplicada entre dois pontos do solo (C_1 e C_2) representados na Figura 2.1 e o potencial elétrico gerado no solo pode ser determinado pela Equação (2.1).

$$dV = -\frac{\rho I dr}{2\pi r^2} \quad (2.1)$$

em que:

- V = Potencial elétrico no solo gerado pela aplicação de uma corrente elétrica, V ;
- I = Corrente elétrica aplicada entre os pontos C_1 e C_2 da Figura 2.1, A ;
- ρ = Resistividade elétrica do solo, $\Omega \text{ m}$;
- r = Distância entre o ponto considerado e o ponto C_1 da Figura 2.1, m .

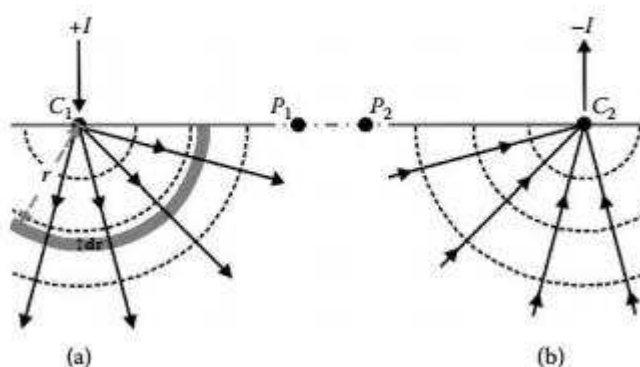


Figura 2.1 – Linhas de corrente (linhas sólidas com setas) e linhas de potencial elétrico (linhas circulares tracejadas) devido a (a) aplicação da corrente $+I$ no

eletrodo C_1 e (b) a coleta da corrente $-I$ do solo por um eletrodo posicionado no ponto C_2 . Fonte: ALLRED et al. (2008).

Integrando-se a Equação (2.1), para obter o potencial elétrico geral pela aplicação de uma corrente elétrica a uma distância r de C_1 , e considerando que quando r tende a infinito o potencial elétrico tende a zero, obtém-se Equação (2.2).

$$V = \frac{\rho I}{2 \pi r} \quad (2.2)$$

Para determinar a condutividade elétrica aparente do solo são utilizados quatro eletrodos, dois eletrodos de corrente e dois eletrodos de potencial. Os eletrodos de corrente aplicam uma corrente elétrica alternada no solo, e os eletrodos de potencial são usados para determinar a diferença de potencial entre dois pontos do solo. Os três arranjos de sensores mais utilizados, conforme a Figura 2.2, são as matrizes de Schlumberger, Wenner e Dipolo-dipolo (ALLRED et al., 2008).

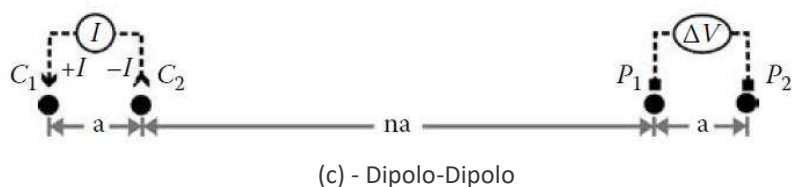
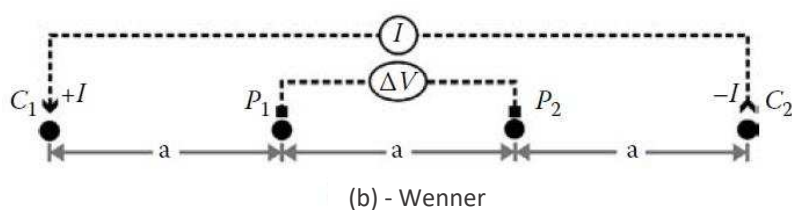
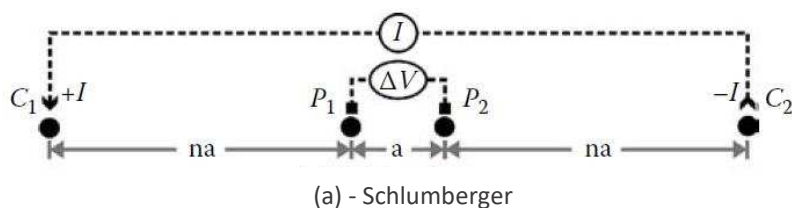


Figura 2.2. Arranjo e espaçamento dos eletrodos de corrente (C_1 e C_2) e de potencial (P_1 e P_2) para sensores que utilizam as matrizes de (a) Schlumberger, (b) Wenner e (c) Dipolo-dipolo (ALLRED et al., 2008).

A matriz de Schlumberger possui um arranjo simétrico, com dois eletrodos de corrente elétrica bem espaçados, localizados nas extremidades, e dois eletrodos de potencial localizados na parte interna do arranjo, conforme ilustrado na Figura 2.2a. Os eletrodos de corrente elétrica (C_1 e C_2) são espaçados por um fator maior que o espaçamento entre os eletrodos de potencial (P_1 e P_2), sendo possível afastar os eletrodos de corrente por grandes distâncias (de até quilômetros), enquanto o espaçamento entre os eletrodos de potencial é mantido constante. Esta característica torna a matriz de Schlumberger um dos melhores arranjos disponíveis para a determinação da CE_a para camadas de solo mais profundas (ALLRED et al., 2008; ASPINALL; GAFFNEY, 2001; REYNOLDS, 1997). Para determinar a condutividade elétrica aparente do solo utiliza-se a Equação (2.3) que é obtida aplicando-se a Equação (2.2) entre os pontos P_1 e P_2 e considerando que a condutividade elétrica é o inverso da resistividade elétrica.

$$CE_a = \frac{1}{\pi n (n + 1) a} \frac{I}{\Delta V} \quad (2.3)$$

em que:

- CE_a = Condutividade elétrica aparente do solo, em $S\ m^{-1}$;
- I = Corrente elétrica aplicada no solo, A;
- ΔV = Diferença de potencial medida, V;
- a = Distância entre os eletrodos de potencial, m;
- n = Razão entre a distância C_1P_1 e a distância P_1P_2 (Figura 2.1a).

A matriz de Wenner também possui um arranjo simétrico, e assim como a matriz de Schlumberger, esta possui dois eletrodos de corrente elétrica localizados nas extremidades, e dois eletrodos de potencial localizados na parte interna do arranjo (Figura 2.2b). No entanto, o espaçamento entre os pares de eletrodos adjacentes é o mesmo para todo o arranjo. Esse arranjo de eletrodos é um dos mais adequados para mapear a CE_a do solo (ALLRED et al., 2008; REYNOLDS, 1997), visto que este possui melhor sinal de resposta, uma vez que o potencial gerado pelos eletrodos de corrente nos pontos P_1 e P_2 tendem a ser mais elevados (SHARMA, 1997). A

condutividade elétrica aparente do solo é determinada utilizando a Equação (2.4), obtida a partir da aplicação da Equação (2.2), para calcular o potencial elétrico nos pontos P_1 e P_2 .

$$CE_a = \frac{1}{2\pi a} \frac{I}{\Delta V} \quad (2.4)$$

A matriz dipolo-dipolo é caracterizada por uma separação relativamente grande entre o par de eletrodos de corrente, localizados em uma das extremidades do arranjo, e o par de eletrodos de potencial, localizados na outra extremidade (Figura 2.2c). Este tipo de arranjo é comumente empregado tanto no mapeamento da CE_a do solo de uma área, quanto a determinação da CE_a para diferentes profundidades (ALLRED et al., 2008; REYNOLDS, 1997; SAMOUËLIAN et al., 2004). Neste caso, para medir a CE_a para diferentes profundidades, o ponto médio da matriz do sensor permanece no mesmo local e o par de eletrodos de potencial e de corrente elétrica são afastados ou aproximados, dependendo da profundidade de estudo desejada (ALLRED et al., 2008). A Equação (2.5) é a equação utilizada para determinar a condutividade elétrica aparente do solo segundo o arranjo mostrado na Figura 2.2.c.

$$EC_a = \frac{1}{\pi n(n+1)(n+2)} \frac{I}{a \Delta V} \quad (2.5)$$

Modelagem inversa de dados de resistividade elétrica

Para obter informações sobre a distribuição da resistividade elétrica do solo, programas de modelagem numérica inversa são necessários. Estes programas fornecem estimativas da resistividade ao longo do perfil vertical ou horizontal do solo (uma dimensão) ou mesmo para planos 2D e 3D da área em estudo, por meio da elaboração de gráficos (uma dimensão) ou imagens (duas ou três dimensões) (ALLRED et al., 2008; HELLMAN et al., 2016; SAMOUËLIAN et al., 2004).

Caso os dados de resistividade obtidos sejam para estudar a variabilidade da resistividade elétrica do solo em duas ou três dimensões, um procedimento de modelagem direta seguido por um procedimento de inversão é necessário. A modelagem direta pode ser feita por meio dos métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos (HELLMAN et al., 2016; SAMOUËLIAN et al., 2004). Já o procedimento de inversão é iniciado com um modelo de estimativa, cujos parâmetros

são atualizados usando um procedimento de ajuste do tipo iterativo linearizado (SAMOUËLIAN et al., 2004).

Relações entre a CE_a e os atributos do solo

Mensurações de CE_a fornecem informações valiosas a respeito do padrão de variabilidade espacial de diversos atributos do solo. Entretanto, a interpretação de valores de CE_a não é algo tão simples, devido à complexidade das vias de fluxo de corrente decorrentes da heterogeneidade espacial das propriedades que influenciam o fluxo de corrente no solo (CORWIN, 2005). As vias de fluxo de corrente que contribuem para a CE_a de um solo são: uma via de condutância através de camadas alternadas de partículas de solo e solução de solo, uma via de condutância através da solução contínua de solo e uma via de condutância através ou ao longo da superfície de partículas do solo que estão em contato direto e contínuo entre si (RHOADES et al., 1999).

O modelo de condutância elétrica proposto por Rhoades et al. (1989) aponta alguns fatores que influenciam a CE_a , incluindo a condutividade elétrica da solução de solo móvel associada a poros grandes contínuos (EC_{wc}); a condutividade elétrica da solução do solo associada a poros descontínuos (EC_{ws}); a condutividade elétrica das partículas do solo (EC_s); o teor volumétrico das partículas de solo; o teor de água volumétrico do solo dos poros pequenos e descontínuos; e o teor de água volumétrico do solo (HEINIGER et al., 2003). Devido à complexa relação desses fatores com os atributos do solo, a CE_a está correlacionada com diversos atributos do solo, tanto de forma direta quanto indireta.

A CE_a é influenciada diretamente pela salinidade, grau de saturação do solo, teor de água no solo, densidade aparente do solo e temperatura do solo (ALLRED et al., 2008; CORWIN, 2005). Alterações no teor de água no solo podem encobrir outros fatores que exercem influência sobre a CE_a . Enquanto o teor de água no solo estiver próximo ao ponto de saturação do solo, a EC_{wc} , que é influenciada diretamente pelo teor de sais dissolvidos na solução do solo, exercerá maior influência na CE_a . Entretanto, caso o teor de água no solo estiver próximo ao ponto de murcha permanente do solo, a EC_s e a EC_{ws} , que são influenciadas diretamente pela capacidade de troca catiônica e teor de sais dissolvidos na solução do solo respectivamente, exercerão maior influência sobre a CE_a (HEINIGER et al., 2003).

A CE_a é influenciada indiretamente por alguns atributos do solo, incluindo a textura do solo e o teor de matéria orgânica. Os teores de argila e matéria orgânica no solo influenciam o grau de saturação do solo e a densidade aparente do solo. Além disso, tanto a argila quanto a matéria orgânica fornecem um caminho de condutância na fase sólido-líquido principalmente por meio de cátions trocáveis, e consequentemente, ambos os atributos possuem influência indireta nas medições de CE_a (ALLRED et al., 2008). Já o teor de areia possui relação inversa com os teores de cátions trocáveis e de água no solo; o teor de ambas as variáveis tendem a diminuir com o aumento do teor de areia no solo. Isso pode explicar a existência de correlações negativas entre o teor de areia e a CE_a (KORSAETH, 2008).

2.3 UM BREVE HISTÓRICO DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NA AGRICULTURA

O primeiro uso de sensores que operam pelo método da RE na agricultura foi para mensurar o teor de água volumétrica do solo (EDLEFSEN; ANDERSON, 1941; KIRKHAM; TAYLOR, 1950). No entanto, foi a partir do uso da RE para estudar a salinidade do solo (RHOADES; INGVALSON, 1971) que este método ganhou notoriedade na agricultura (ALLRED et al., 2008).

Durante as décadas de 1990 e 2000, o avanço tecnológico possibilitou diferentes tipos de aplicações para o método da RE. Em grande parte, isso se deu pela maior acessibilidade à computadores pessoais, dispositivos de sistemas globais de navegação por satélite (GNSS), sistemas de informação geográfica (GIS), dentre outros (ALLRED et al., 2008; CORWIN; LESCH, 2005; HELLMAN et al., 2016; SERRANO et al., 2014). No início da década de 1990, foram desenvolvidos os primeiros programas de computadores de inversão de RE para a criação de modelos que estimam a distribuição da RE no solo (HELLMAN et al., 2016). Desde então, diversos estudos na área agrícola passaram a utilizar programas de computadores de inversão de RE com modelos 2D e 3D (AMATO et al., 2009; GANIYU et al., 2020; SÉGER et al., 2009; VAN DER KROEF et al., 2020). Em meados da década de 1990, o desenvolvimento de sensores de CE_a móveis juntamente à disponibilidade de dispositivos GNSS e de sistemas de informação geográfica, tornaram a determinação da CE_a pelo método da RE uma das técnicas mais confiáveis para caracterizar o padrão espacial das propriedades do solo em campo (ALLRED et al., 2008; CORWIN;

LESCH, 2005; SERRANO et al., 2014). O uso destes sensores móveis acoplados a um dispositivo GNSS tornou possível produzir mapas de CE_a com determinações feitas utilizando uma maior densidade de pontos amostrais, economizando um tempo de operação considerável (ALLRED et al., 2008). A Figura 2.3 ilustra um sensor móvel (Veris 3100) que opera pelo método da RE, fabricado pela Veris Technologies, Inc. (Salina, KS - EUA).



Figura 2.3. Sensor de resistividade elétrica do solo Veris 3100 (CORWIN; LESCH, 2005).

O desenvolvimento de sensores de RE de múltiplos canais e eletrodos controlados por computador reduziram significativamente o tempo de coleta de dados (CUBBAGE et al., 2017; EL-QADY et al., 2019; YAMASHITA et al., 2014). Estes sensores podem ser compostos por um conjunto relativamente grande de eletrodos, podendo chegar até mais de 100 (ALLRED et al., 2008). A determinação da CE_a nestes sensores é totalmente automatizada, permitindo que qualquer combinação de quatro eletrodos seja conectada ao medidor de resistividade a qualquer momento, tornando a aquisição de dados mais rápida (SAMOUËLIAN et al., 2004).

O conceito de sensores de CE_a de múltiplas frequências começou a ganhar destaque na última década. Lück e Rühlmann (2013) propuseram o uso de um novo sistema para mapear a CE_a do solo. Neste, as medições de CE_a podem ser tomadas em até cinco profundidades diferentes e através de correntes elétricas de frequências que podem variar de 1 mHz a 1 kHz. Segundo os autores, para as quatro frequências estudadas (62,5; 125; 187,5; e 562,5 Hz), a maior incidência de ruídos nas leituras do sensor esteve associada às menores frequências. Queiroz et al. (2020) propuseram o

uso de um sensor de RE de múltiplas frequências utilizando um computador de placa única de baixo custo (BeagleBone Black) e uma interface gráfica para o usuário, facilitando a aquisição e análise dos dados coletados. Devido à escassez de informações sobre o assunto, o desenvolvimento destes sensores pode impulsionar pesquisas futuras no sentido de explorar mais a fundo o efeito da frequência da corrente elétrica na leitura obtida pelo sensor e na qualidade destas leituras.

2.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

A medição da variabilidade dos atributos físicos e químicos do solo de forma precisa sempre foi uma das prioridades dos métodos de agricultura de precisão (CORWIN; LESCH, 2005). O uso da CE_a , determinada pelo método da RE, para caracterizar a variabilidade espacial do solo é um método já consolidado, devido à forte relação da CE_a com diversos atributos físicos e químicos do solo e à estabilidade de seu padrão de variabilidade espaço-temporal (BOTTEGA et al., 2017a; MEDEIROS et al., 2016; PEDRERA-PARRILLA et al., 2017). Além disso, a caracterização da variabilidade espacial é um componente essencial para diversas aplicações em campo, incluindo definição de zonas de manejo (ZM), avaliação da qualidade do solo, mapeamento dos atributos do solo, avaliação de mudanças no solo induzidas pelo manejo, e modelagem de transporte de solutos no solo (ALLRED et al., 2008; AN et al., 2020; HOVHANNISSIAN et al., 2019; NOCCO et al., 2019).

As áreas de cultivo que apresentam características semelhantes em relação ao potencial de produtividade da cultura são denominadas zonas de manejo (ZM). A definição das ZM é uma tarefa difícil devido à complexa combinação de fatores antropogênicos, edáficos, meteorológicos e biológicos, que afetam a produtividade das culturas em campo (CORWIN; LESCH, 2005). Mapas de CE_a têm sido comumente utilizados para a definição de ZM (ALVES et al., 2013; BOTTEGA et al., 2017b; MORAL; SERRANO, 2019; REYES et al., 2019; SAIFUZZAMAN et al., 2019; URIBEETXEBARRIA et al., 2018; VALENTE et al., 2012b), devido ao seu baixo custo, rapidez e precisão na obtenção de informações espaciais de propriedades antropogênicas, tais como fração de lixiviação, padrões de irrigação e drenagem e padrões de compactação devido ao uso de máquinas agrícolas, e informações relacionadas aos atributos do solo (CORWIN; LESCH, 2005).

Valente (2010) propôs um sistema de apoio à decisão para delimitação de ZM, de forma automática, utilizando-se o algoritmo fuzzy k-means. Alguns estudos adotaram esse método para definir ZM a partir de dados de CE_a (ALVES et al., 2013; BOTTEGA et al., 2017b; VALENTE et al., 2012b). Utilizando diferentes combinações entre dados de altitude e CE_a (para os perfis de solo de 0,0 a 0,2 m e de 0,0 a 0,4 m), Valente et al. (2012b) definiram ZM para uma área de plantio de café (*Coffea Arabica* L.). Para quantificar o grau de concordância entre as ZM geradas e os atributos físicos e químicos do solo coletados, coeficientes Kappa foram calculados. Os autores apontaram que os melhores resultados foram obtidos para as ZM definidas usando dados de altitude em conjunto com a CE_a . Nessas ZM, foram obtidos valores de coeficientes Kappa para o potássio e fósforo remanescente equivalentes a 0,45 e 0,49, respectivamente. Estes elementos possuem forte relação com a qualidade e produtividade do café, sendo o potássio um elemento associado à qualidade do café e o fósforo remanescente um parâmetro importante para o planejamento de aplicação de fertilizantes (VALENTE et al., 2012b). Alves et al. (2013), além de dados de altitude e CE_a (para os perfis de solo de 0,0 a 0,2 m e de 0,0 a 0,4 m), utilizaram dados de matéria orgânica para definir ZM em áreas de plantio direto de milho e soja. Como resultado, as ZM definidas a partir de dados de matéria orgânica ou de CE_a apresentaram melhor desempenho na classificação para os atributos referentes à textura do solo. Bottega et al. (2017b) caracterizaram a produtividade em uma área de plantio de soja em que zonas de manejo foram delimitadas com base em mapas de CE_a e de atributos relacionados à textura do solo. Para isso, ZM geradas pelos atributos separados ou combinados foram submetidos à uma análise de concordância com a ZM gerada pelos dados de produtividade. Os resultados mostraram que a ZM gerada utilizando a CE_a apresentou maior concordância com a ZM gerada pelos dados de produtividade.

O uso de informações auxiliares para a aplicação do método da resistividade

Apesar da variabilidade espacial dos atributos do solo ser uma informação essencial para diversas atividades na agricultura de precisão (irrigação e aplicação de fertilizantes), em alguns casos, somente essa informação não é o bastante. Para saber quando, onde e qual a quantidade de insumos a ser aplicada, é necessário um conhecimento das condições da cultura e do solo em tempo real (CORWIN; LESCH,

2005; SCUDIERO et al., 2013). A caracterização em tempo real da condição da cultura e, até certo ponto, da condição do solo, é melhor obtida por meio de sensoriamento remoto (CORWIN; LESCH, 2005; REYES et al., 2019; XUE et al., 2017). Neste sentido, o uso do sensoriamento remoto juntamente às mensurações de CE_a vêm ganhando destaque em aplicações de agricultura de precisão.

Imagens obtidas por sensoriamento remoto (multi e hiperespectrais) e mapas de CE_a fornecem informações complementares. Enquanto as imagens obtidas por sensoriamento remoto são geralmente mais adequadas para caracterizar a variabilidade espacial das propriedades associadas ao desenvolvimento vegetativo das culturas, os mapas de CE_a são mais adequados para caracterizar a variabilidade espacial das propriedades estáticas do solo (ALLRED et al., 2008; RADOGLU-GRAMMATIKIS et al., 2020). O uso combinado destes métodos têm sido tema de diversos estudos nos últimos anos (BERNARDI et al., 2017; HU et al., 2019; MARTÍNEZ-CASASNOVAS et al., 2017; ORTEGA-BLU; MOLINA-ROCO, 2016; REYES et al., 2019; SAIFUZZAMAN et al., 2019; SERRANO et al., 2019; URIBEETXEBarria et al., 2018).

Ortega-Blu e Molina-Roco (2016) avaliaram o uso da CE_a e de diferentes índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferenças Normalizada (NDVI) e o Índice de Verdor (GVI), para o monitoramento da qualidade e produtividade em um vinhedo. Como resultado, o uso combinado destes métodos mostrou-se promissor. O GVI apresentou forte relação com a qualidade e produtividade de uva. Já a análise dos dados de CE_a , em algumas regiões, permitiu explicar parte da variação do vigor das plantas. Bernardi et al. (2017) avaliaram a variabilidade espacial do NDVI, CE_a e atributos físicos e químicos do solo em um sistema de integração lavoura-pecuária. Os autores destacaram que o NDVI apresentou um padrão de distribuição espacial semelhante à CE_a (Figura 2.4). No entanto, um comportamento distinto da relação entre a CE_a e o NDVI foi observado por Uribeetxebarria et al. (2018). Com base em dados de CE_a e de NDVI, estes autores avaliaram os efeitos da variabilidade induzida do solo e suas implicações no manejo de precisão em um pomar de pêssego. Os resultados indicaram a ausência de relação entre a CE_a e o NDVI. Segundo os autores, a causa desse comportamento entre as duas variáveis pode ser atribuída à influência do sistema de fertirrigação (irrigação por gotejamento), que mantém a área radicular livre (ou com níveis toleráveis pelos

pessegueiros) de saís. Nestas condições, a cultura pode ser mais afetada pelo manejo da irrigação do que pelas propriedades do solo.

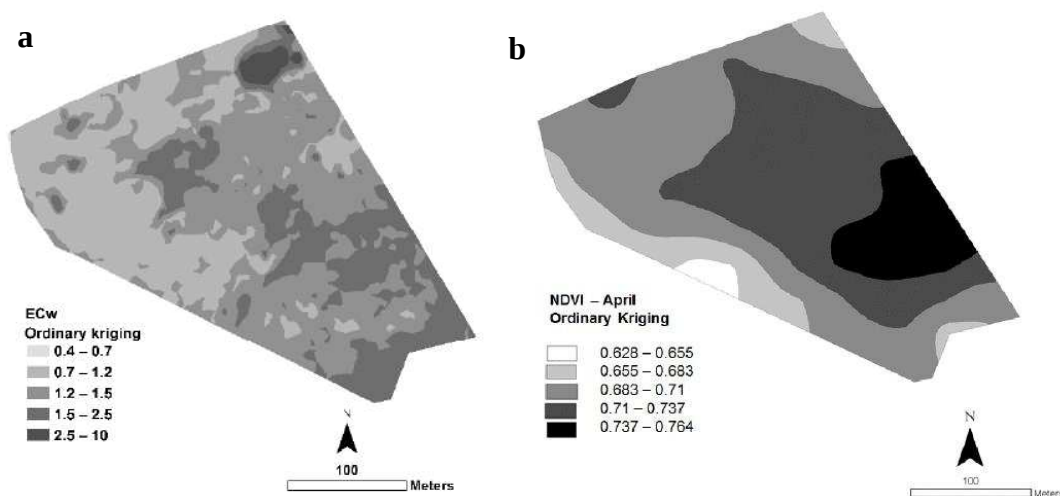


Figura 2.4. Mapas de valores estimados de CE_a (a) e NDVI (b) para uma área de plantio de milho (BERNARDI et al., 2017).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método da resistividade elétrica para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo é um dos métodos mais populares para a caracterização dos atributos do solo na agricultura de precisão. Tal fato se justifica devido à sua simplicidade, rapidez, baixo custo e confiabilidade na medição. Além disso, este método fornece informações valiosas sobre o padrão de variabilidade espacial de diversos atributos do solo de interesse agrônomo, tornando possível dividir a área de cultivo em regiões menores que apresentam características semelhantes em relação ao potencial de produtividade da cultura, regiões essas que são comumente denominadas zonas de manejo. Outras aplicações deste método podem incluir a avaliação da qualidade do solo, mapeamento de atributos do solo, avaliação de mudanças no solo induzidas pelo manejo, e modelagem de transporte de solutos no solo.

A integração de diferentes informações com as de condutividade elétrica aparente do solo para otimizar o manejo das culturas em campo é uma estratégia que vem ganhando cada vez mais destaque. Em especial, o uso de informações obtidas por imagens aéreas (multi e hiperespectrais) fornecem informações complementares ao mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo. Ao contrário de sensores de resistividade elétrica, o sensoriamento remoto é mais adequado para caracterizar a

variabilidade espacial das propriedades associadas ao desenvolvimento vegetativo das plantas.

O desenvolvimento de sensores de condutividade elétrica mais sofisticados, como por exemplo os sensores de múltiplos canais e eletrodos controlados por computador, reduziram significativamente o tempo de coleta de dados. Já os sensores de múltiplas frequências demonstram potencial para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo com melhor qualidade.

2.6 REFERÊNCIAS

- ALLRED, B. J.; DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R. **Handbook of agricultural geophysics**. Boca Raton, FL - USA: CRC Press, 2008.
- ALVES, S. M. DE F. et al. Definição de Zonas de Manejo a partir de mapas de Condutividade Elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v. 29, p. 104–114, 2013.
- AMATO, M. et al. Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 4, p. 213–222, 2009.
- AN, N. et al. An experimental application of electrical resistivity/resistance method (ERM) to characterize the evaporation process of sandy soil. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 117, n. March, 2020.
- ASPINALL, A.; GAFFNEY, C. F. The Schlumberger array—potential and pitfalls in archaeological prospection. **Archaeological Prospection**, v. 8, n. 3, p. 199–209, 2001.
- BERNARDI, A. C. D. C. et al. Spatial variability of vegetation index and soil properties in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 513–518, 2017.
- BOTTEGA, E. L. et al. Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 2, p. 134–142, 2015.
- BOTTEGA, E. L. et al. Precision agriculture applied to soybean crop: Part II - Temporal stability of management zones. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 6, p. 676–682, 2017a.

BOTTEGA, E. L. et al. Precision agriculture applied to soybean: Part I - Delineation of management zones. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 5, p. 573–579, 2017b.

CORWIN, D. L. Geospatial measurements of apparent soil electrical conductivity for characterizing soil spatial variability. **Soil-water-solute process characterization: An integrated approach**. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 639-672, 2005.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1- 3 SPEC. ISS., p. 11–43, 2005.

CUBBAGE, B.; NOONAN, G. E.; RUCKER, D. F. A Modified Wenner Array for Efficient Use of Eight-Channel Resistivity Meters. **Pure and Applied Geophysics**, v. 174, n. 7, p. 2705–2718, 2017.

EDLEFSSEN, N. E.; ANDERSON, A. B. C. The four-electrode resistance method for measuring soil-moisture content under field conditions. **Soil Science**, v. 51, p. 367–376, 1941.

EL-QADY, G.; METWALY, M.; DRAHOR, M. G. Geophysical Techniques Applied in Archaeology. **Archaeogeophysics**. 2019.

FORTES, R. et al. and guided soil samples to improve irrigation zoning. **Precision Agriculture**, p. 441–454, 2015.

GANIYU, S. A. et al. Investigation of soil moisture content over a cultivated farmland in Abeokuta Nigeria using electrical resistivity methods and soil analysis. **Journal of King Saud University - Science**, v. 32, n. 1, p. 811–821, 2020.

GE, Y.; THOMASSON, J. A.; SUI, R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. **Frontiers of Earth Science**, v. 5, n. 3, p. 229–238, 2011.

GUPTA, S.; KUMAR, M.; PRIYADARSHINI, R. **Electrical Conductivity Sensing for Precision Agriculture: A Review**. Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms. **Anais...**Singapore: Springer, 2019

HEINIGER, R. W.; MCBRIDE, R. G.; CLAY, D. E. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 508-519, 2003.

HELLMAN, K. et al. **Resistivity inversion software comparison**. 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience 2016. Barcelona, Spain: 2016.

HOVHANNISSIAN, G. et al. Mapping spatial distribution of soil properties using electrical resistivity on a long term sugarcane trial in South Africa. **Geoderma**, v. 349, n. May 2018, p. 56–67, 2019.

JAWAD, H. M. et al. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 8, 2017.

KIRKHAM, D.; TAYLOR, G. S. Some tests of a four-electrode probe for soil moisture measurement. **Soil Science Society of America Journal**, v. 12, p. 42–46, 1950.

KORSAETH, A. Dependence of Soil Apparent Electrical Conductivity (ECa) upon Soil Texture and Ignition Loss at Various Depths in Two Morainic Loam Soils in Southeast Norway. In ALLRED, B. J.; DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R. (Ed.). **Handbook of agricultural geophysics**. P.217-222. Boca Raton, FL - USA: CRC Press, 2008.

KURTULUŞ, C.; YEKEN, T.; DURDAĞ, D. Estimating the Soil Water Content Using Electrical Conductivity, Oven Method and Speedy Moisture Tester. **Eurasian Soil Science**, v. 52, n. 12, p. 1577–1582, 2019.

LINDBLOM, J. et al. Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 3, p. 309–331, 2017.

LÜCK, E.; RÜHLMANN, J. Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS — Information about lateral and vertical soil heterogeneity. **Geoderma**, v. 199, p. 2–11, 2013.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. et al. Combined use of remote sensing and soil sensors to detect variability in orchards with previous changes in land use and landforms: consequences for management. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 492–497, 2017.

MEDEIROS, W. N. et al. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, p. 150–159, 2016.

- MEDEIROS, W. N. et al. Apparent soil electrical conductivity in two different soil types. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 49, n. 1, p. 43–52, 2018.
- MORAL, F. J.; SERRANO, J. M. Using low-cost geophysical survey to map soil properties and delineate management zones on grazed permanent pastures. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 5, p. 1000–1014, 2019.
- NOCCO, M. A. et al. Combining evapotranspiration and soil apparent electrical conductivity mapping to identify potential precision irrigation benefits. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, 2019.
- ORTEGA-BLU, R.; MOLINA-ROCO, M. Evaluation of vegetation indices and apparent soil electrical conductivity for site-specific vineyard management in Chile. **Precision Agriculture**, v. 17, n. 4, p. 434–450, 2016.
- PEDRERA-PARRILLA, A. et al. Concurrent temporal stability of the apparent electrical conductivity and soil water content. **Journal of Hydrology**, v. 544, p. 319–326, 2017.
- QUEIROZ, D. M. et al. Development and Testing of a low-Cost Portable Apparent Soil Electrical Conductivity Sensor Using a BeagleBone Black. **Applied Engineering in Agriculture**, v.35(3), p. 341-355, 2020.
- RADOGLU-GRAMMATIKIS, P. et al. A compilation of UAV applications for precision agriculture. **Computer Networks**, v. 172, n. February, p. 107148, 2020.
- REYES, J. et al. Delineating Site-Specific Management Zones and Evaluating Soil Water Temporal Dynamics in a Farmer’s Field in Kentucky. **Vadose Zone Journal**, v. 18, n. 1, p. 1–19, 2019.
- REYNOLDS, J. M. **An introduction to Applied Environmental Geophysics**. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- RHOADES, J. D.; INGVALSON, R. D. Determining Salinity in Field Soils With Resistance Measurements. **Soil Science Society of America Journal**, v. 35, n. 1, p. 54, 1971.
- RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J. Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, 53(2), 433, 1989.
- RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Geospatial measurements of soil

electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. **Geophysical Monograph-American Geophysical Union**, v. 108, p. 197–216, 1999.

SAIFUZZAMAN, M. et al. Clustering tools for integration of satellite remote sensing imagery and proximal soil sensing data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 9, p. 1–17, 2019.

SAMOUËLIAN, A. et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2004.

SANA, R. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 994–1002, 2014.

SCUDIERO, E. et al. Delineation of site-specific management units in a saline region at the Venice Lagoon margin, Italy, using soil reflectance and apparent electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 54–64, 2013.

SÉGER, M. et al. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 387–398, 2009.

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. Spatial and temporal patterns of apparent electrical conductivity: Dualem vs. Veris sensors for monitoring soil properties. **Sensors**, v. 14, n. 6, p. 10024–10041, 2014.

SERRANO, J. et al. Integration of Soil Electrical Conductivity and Indices Obtained through Satellite Imagery for Differential Management of Pasture Fertilization. **AgriEngineering**, v. 1, n. 4, p. 567–585, 2019.

SHARMA, P. V. **Environmental and Engineering Geophysics**. Cambridge, UK.: Cambridge University Press, 1997.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T. Inversion of soil electrical conductivity data to estimate layered soil properties. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 433–438, 2017.

TERRÓN, J. et al. Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. **Precision Agriculture**, p. 750–761, 2011.

TEY, Y. S.; BRINDAL, M. Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: A review for policy implications. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 713–730, 2012.

TSOULIAS, N. et al. **Calculating the water deficit of cherry orchard by means of spatially resolved approach**. ASABE 2018 Annual International Meeting. 2018

URIBEETXEBARRIA, A. et al. Spatial variability in orchards after land transformation: Consequences for precision agriculture practices. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 343–352, 2018.

VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2010.

VALENTE, D. S. M. et al. Relação entre condutividade elétrica aparente e propriedades do solo. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 43, n. 4, p. 683–690, 2012a.

VALENTE, D. S. M. et al. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 3, p. 173–179, 2012b.

VALENTE, D. S. M. et al. Spatial variability of apparent electrical conductivity and soil properties in a coffee production field. **Engenharia Agricola**, v. 34, n. 6, p. 1224–1233, 2014.

VAN DER KROEF, I. et al. Digital mapping of buried soil horizons using 2D and pseudo-3D geoelectrical measurements in a ground moraine landscape. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 1, p. 10–26, 2020.

XUE, Z. et al. Sparse graph regularization for robust crop mapping using hyperspectral remotely sensed imagery with very few in situ data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 124, p. 1–15, 2017.

YAMASHITA, Y. et al. A Method to Calculate Chargeability on Multiple-Transmission Resistivity Profile Using Code-Division Multiple-Access. **Society of Exploration Geophysicists**, p. 5, 2014.

3 ANÁLISE DE DIFERENTES FREQUÊNCIAS DA CORRENTE ELÉTRICA NA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO

RESUMO

A condutividade elétrica aparente do solo (CE_a), medida pelo método da resistividade elétrica, é comumente usada para delimitar áreas que possuem solos com características físicas e químicas semelhantes. O método da resistividade elétrica consiste em aplicar uma corrente elétrica alternada de baixa frequência no solo e determinar a diferença de potencial em dois pontos pré-determinados resultantes da aplicação da corrente elétrica. Entretanto, ainda há incerteza sobre a faixa de frequência ideal a ser utilizada e sobre a influência da frequência do sinal do sensor nos valores obtidos pelo sensor. Portanto, o presente estudo teve por objetivo avaliar se a frequência da corrente elétrica influencia o valor da CE_a , obtida pelos sensores que utilizam o método da resistividade elétrica. Além disso, buscou-se avaliar se existe uma faixa ideal de frequência da corrente elétrica do sensor, no qual a CE_a melhor se correlaciona com os atributos químicos e físicos do solo de interesse agrônomo. Para isso, determinações de CE_a foram obtidas em quatro áreas experimentais, utilizando-se seis diferentes frequências de corrente elétrica: 1, 5, 10, 20, 30 e 40 Hz. A influência da frequência do sinal de corrente elétrica sobre o valor obtido pelo sensor foi analisada por meio de regressões lineares em todas as áreas experimentais, seguido pelo teste F ($p \leq 0,05$). Correlações de Pearson ($p \leq 0,05$) foram calculadas, de forma a quantificar as correlações entre CE_a e os atributos físicos e químicos do solo, para cada frequência do sinal de corrente elétrica do sensor. Com base no número de correlações significativas encontradas para cada frequência, a homogeneidade foi analisada pelo teste de qui-quadrado ($p \leq 0,05$). Resultados obtidos pelo teste F apontaram que, à exceção de dois pontos experimentais, o sinal de frequência de um sensor de CE_a não interfere no valor obtido por ele ($p > 0,05$). Além disso, entre nove e onze correlações significativas foram observadas entre a CE_a e os atributos do solo, para as diferentes frequências de corrente elétrica. No entanto, não foi observada relação entre o número de correlações significativas e a frequência da corrente elétrica.

Palavras-chave: Método da resistividade elétrica, agricultura de precisão, sensores de solo

ABSTRACT

The apparent soil electrical conductivity (EC_a), measured by the electrical resistivity method, is commonly used to delimit areas that have soils with similar chemical and physical characteristics. The electrical resistivity method consists in applying a low-frequency alternating electric current in the soil and determining the potential difference at two predetermined points resulting from the application of electric current. However, there is still uncertainty about the ideal frequency range to be used and the influence of the signal frequency on the values measured by the sensor. Therefore, the objective of the present study was to evaluate whether the electric current frequency influences the value of EC_a , obtained by sensors that use the electrical resistivity method. In addition, it was sought to evaluate whether there is a correlation between the EC_a measured using different frequencies and the soil chemical and physical attributes of agronomic interest. For this, EC_a measurements were made in four experimental areas, using six different frequencies of electric current: 1, 5, 10, 20, 30 and 40 Hz. The influence of the electric current signal frequency on the value obtained by the sensor was analyzed by linear regressions in all experimental areas, followed by the F test ($p \leq 0.05$). Pearson's correlations ($p \leq 0.05$) were calculated to quantify the correlations between EC_a and soil physical and chemical attributes, for each frequency of the electric current signal of the sensor. Based on the number of significant correlations found for each frequency, homogeneity was analyzed using the chi-square test ($p \leq 0.05$). Results obtained by the F test indicated that, except for two experimental points, the frequency signal of an EC_a sensor does not interfere with the value obtained by it ($p > 0.05$). In addition, nine to eleven significant correlations were observed between EC_a and soil attributes for the different frequencies of electric current. However, no relationship was observed between the number of significant correlations and the frequency of the electrical current.

Key words: Electrical resistivity method, precision agriculture, soil sensors

3.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das características do solo é fundamental para se definir as dosagens corretas de fertilizantes e corretivos em sistemas de aplicação à taxas variadas. A metodologia tradicional para se caracterizar a variabilidade espacial de atributos do solo é por meio de amostragem em malha, seguida por uma análise laboratorial. Entretanto, essa técnica demanda uma densidade amostral elevada para obtenção de resultados confiáveis, isso implica em elevado tempo de amostragem e em alto custo (ADAMCHUK et al., 2004; QUEIROZ et al., 2017). Nesse sentido, o uso de sensores pode auxiliar na caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo (ADAMCHUK et al., 2004; GAŁUSZKA et al., 2015).

Dentre os sensores de solo, os de condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) têm sido bastante utilizados para caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo. Por meio de circuitos elétricos próprios, estes sensores medem a capacidade das partículas do solo em conduzir corrente elétrica. Ao entrar em contato com o sensor, o solo se torna uma extensão do circuito, e com isso, a variação das condições locais são detectadas em forma de alteração do valor do sinal obtido pelo dispositivo (ADAMCHUK; ROSSEL, 2010).

A CE_a é fortemente correlacionada com o teor de água no solo, podendo também detectar variação em alguns atributos do solo como a textura, salinidade, capacidade de trocas de cátions (CORWIN; LESCH, 2003; TERRÓN et al., 2011; FORTES et al., 2015), pH (TERRÓN et al., 2011; SANA et al., 2014; FORTES et al., 2015), tamanho e distribuição dos poros, temperatura e teor de matéria orgânica (CORWIN; LESCH, 2003; FORTES et al., 2015). Além disso, a CE_a pode estar correlacionada com parâmetros da cultura como a produtividade (JOHNSON et al., 2005; JUNG et al., 2005; SINGH et al., 2016), que por sua vez se correlaciona com a capacidade de retenção de água no solo (GRISSE et al., 2009; RUDOLPH et al., 2015).

Os sensores de CE_a do solo são divididos em dois grupos principais, de acordo com seu método de funcionamento: os sensores de contato e os de não contato (SERRANO et al., 2014). O primeiro tipo de sensor é baseado no princípio da resistividade elétrica. O sensor mais utilizado com base nesse princípio é o que utiliza um conjunto de quatro eletrodos igualmente espaçados. Uma corrente elétrica de baixa frequência é aplicada ao solo por meio dos eletrodos externos e uma diferença de potencial é medida nos eletrodos internos. Com base na corrente elétrica aplicada, na

diferença de potencial determinada e na distância entre eletrodos, a condutividade elétrica aparente do solo é calculada (SUDDUTH et al., 2013; GUNN et al., 2015). A distância entre os eletrodos determina a profundidade da camada de solo para a qual a CE_a está sendo determinada. O segundo tipo de sensor é baseado no método da indução eletromagnética (EMI), em que a CE_a do solo é medida induzindo uma corrente elétrica no solo por meio de uma bobina e uma segunda bobina recebe o sinal de resposta do solo. A relação entre esses dois sinais é utilizada para se determinar a condutividade elétrica aparente do solo (TANG et al., 2019). O espaçamento entre as bobinas indutoras e receptoras é determinante para a profundidade de operação do dispositivo (SUDDUTH et al., 2013). Os sensores com base na resistividade elétrica têm sido os mais utilizados, devido a sua maior simplicidade e menor custo de aquisição.

Para os sensores que trabalham pelo método da resistividade elétrica, a escolha da fonte de energia do dispositivo é de suma importância para a obtenção de dados precisos. Um dos problemas associados a esse método é a formação de potenciais elétricos indesejáveis, devido à polarização dos eletrodos causado pelo contato entre o metal da barra que forma esse eletrodo e a solução eletrolítica aquosa presente no solo. Para reduzir o efeito desse fenômeno, os sensores baseados no método da resistividade elétrica devem aplicar uma corrente elétrica de baixa frequência no solo. A utilização de correntes elétricas de alta frequência reduz a densidade de corrente elétrica com a profundidade (ALLRED et al., 2008).

Nos sensores de CE_a pelo método da resistividade, tem sido usada correntes alternadas na faixa de frequência inferior a 100 Hz (TELFORD et al., 1990; HERMAN, 2001; ALLRED et al., 2008). Embora altas frequências possam resultar em um aumento na relação sinal/ruído, o uso de baixas frequências é recomendado pois os efeitos não controlados nos eletrodos, como o acoplamento capacitivo e efeitos eletromagnéticos, aumentam com a frequência do sinal (LÜCK; RÜHLMANN, 2013). No entanto, ainda há incerteza sobre a faixa de frequência ideal a ser utilizada e sobre a influência da frequência do sinal do sensor nos valores de medição deste. Abu-Hassanein et al. (1996) utilizaram um sensor com base na resistividade elétrica, operando à frequência de sinal igual a 60 Hz, para avaliar a sensibilidade dos valores de CE_a ao teor de água, esforço de compactação e início da saturação no solo. Já Oates

et al. (2014) utilizaram um sensor para monitorar o teor de água no solo com uma frequência de 20 Hz.

Portanto, a influência da frequência do sinal da corrente elétrica aplicada no solo no valor de CE_a do solo pelos sensores que utilizam o método da resistividade elétrica é um assunto que não está claramente definido. Diante disso, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar se a frequência da corrente elétrica influencia o valor de CE_a do solo obtidos pelos sensores que utilizam o método da resistividade elétrica. Procurou-se avaliar também se existe correlação entre a faixa de frequência e os atributos químicos e físicos do solo de interesse agrônomo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Áreas experimentais

O estudo foi conduzido em quatro áreas experimentais (A1, A2, A3 e A4). A Tabela 3.1 fornece localizações e informações de características para os quatro campos.

Tabela 3.1. Localização das áreas experimentais.

Área	Município	Latitude (S)	Longitude (O)	Tamanho (ha)	Ocupação da área
A1	Viçosa - MG	20°46'24,63"	42°52'23,17"	0,10	Pastagem
A2	Viçosa - MG	20°46'4,36"	42°52'9,14"	0,12	Cultivo de feijão
A3	Viçosa - MG	20°44'45,11"	42°50'35,94"	2,31	Cultivo de milho, com presença de palhada
A4	Paula Cândido - MG	20°49'41,78"	42°55'9,54"	0,65	Cultivo de café

A área A1 era uma área em que se cultivava pastagem de Tyfton (*Cynodon spp.*), com presença de cobertura vegetal. O campo experimental A2 era tradicionalmente cultivado utilizando diferentes culturas e diferentes sistemas de preparo de solo. Durante a execução do experimento, a área A2 estava sendo cultivada com feijão tanto usando preparo de solo convencional quanto plantio direto. A área A3 consistiu em uma área em que havia sido cultivada com milho e apresentava presença de palhada sobre o solo. Já a área A4 era destinada ao cultivo de café (Tabela 3.1). As áreas A1, A2 e A3 possuem relevo plano com altitudes médias de aproximadamente 677, 660 e 655 m, respectivamente; e a área A4 possui relevo montanhoso, com altitude média de 750 m. O clima da região é do tipo Cwa (subtropical úmido, com inverno seco e verão chuvoso) de acordo com a classificação de Köppen, precipitação média anual de 1229

mm, umidade relativa média de 80% e temperatura média anual de 20,6 °C. O solo predominante nas quatro áreas experimentais é o solo de textura argilosa, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2011).

3.2.2 Determinação da condutividade elétrica aparente do solo

Para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) foi utilizado um sensor portátil desenvolvido por Queiroz et al. (2020). O projeto do sensor foi baseado no arranjo de matriz Wenner (Figura 3.1), em que os quatro eletrodos do sensor são espaçados igualmente e dispostos linearmente. O sensor utilizado apresentava distância entre eletrodos de 30 cm. As determinações de CE_a foram realizadas utilizando-se seis diferentes frequências de corrente elétrica: 1, 5, 10, 20, 30 e 40 Hz. A condutividade elétrica aparente do solo para eletrodos dispostos segundo a matriz de Wenner é calculada por meio da Equação 3.1.

$$CE_a = \frac{1000 i}{2 \pi l \Delta U_{CD}} \quad (3.1)$$

Em que:

CE_a = Condutividade elétrica aparente do solo ($mS.m^{-1}$);

ΔU_{CD} = Diferença de potencial elétrico determinado entre os eletrodos C e D (V);

i = Corrente elétrica aplicada ao solo (A);

l = Espaçamento entre os eletrodos (m).

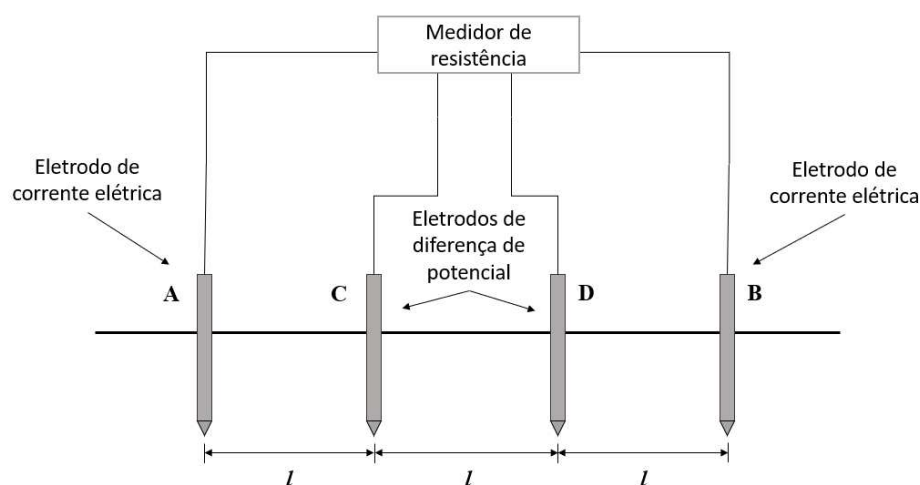


Figura 3.1. Esquema do funcionamento do sensor de condutividade elétrica aparente do solo pelo método da resistividade elétrica, utilizando um sensor de quatro eletrodos igualmente espaçados. Fonte: Adaptado de Corwin e Lesch (2005).

3.2.3 Coleta de dados

Foram amostrados cinco pontos em cada área (A1, A2, A3 e A4), conforme mostrado na Figura 3.2. Para cada ponto amostrado a CE_a do solo foi determinada utilizando as seis frequências de corrente elétrica. Para cada frequência, foram realizadas 10 determinações da condutividade elétrica, sendo que em cada determinação, o sensor foi colocado em uma posição aleatória em um raio de três metros em torno do ponto de medição. O raio de amostragem foi baseado na precisão do módulo GNSS do sensor, sendo esta de aproximadamente $\pm 1,8$ m. As coletas de dados nas áreas experimentais foram realizadas logo após um período chuvoso, em um intervalo de tempo de oito dias.





Figura 3.2. Pontos de coletas de dados nas áreas A1, A2, A3 e A4 .

Para avaliar se existe correlação entre a faixa de frequência e os atributos químicos e físicos do solo, em cada ponto amostral foram coletadas quatro amostras de solo de forma aleatória, em um raio de até três metros em torno do ponto de coleta do sensor. Em seguida, estas foram homogeneizadas e armazenadas em um recipiente plástico etiquetado. As amostras foram coletadas usando um trado do tipo holandês e retiradas na profundidade de 0,00 – 0,30 m, uma vez que esta foi a profundidade da camada de solo medida pelo sensor de CE_a . As amostras foram encaminhadas para análise em laboratório para a determinação dos atributos do solo. Os atributos do solo, físicos e químicos, analisados foram: teor de água no solo (U), capacidade de retenção de água no solo, até o potencial matricial de 10 kPa (CRA), teor de cálcio trocável no solo (Ca^{2+}), teor de magnésio trocável no solo (Mg^{2+}), teor de alumínio trocável no solo (Al^{3+}), acidez potencial (H+Al), potencial hidrogeniônico (pH), fósforo remanescente (P-Rem), teor de silte (S), teor de argila (Arg), teor de areia grossa (Ag), teor de areia fina (Af), teor de matéria orgânica (MO), teor de fósforo (P) e teor de potássio (K). As propriedades do solo em estudo com seu respectivo método de determinação em laboratório são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Métodos para determinação dos atributos do solo estudados.

Atributos do solo	Unidade	Método para determinação	Referências
U	% b.s.	Método gravimétrico	Claessen et al. (1997)

CRA	kg/kg	Método da câmara de pressão de Richards	EMBRAPA (2017)
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Al ³⁺	cmol _c /dm ³	Extrator KCl 1 mol/L	Claessen et al. (1997)
H+Al	cmol _c /dm ³	Extrator de acetato de cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0	Claessen et al. (1997)
pH	-	Determinado usando solução solo:líquido (água destilada), na proporção 1:2,5	Claessen et al. (1997)
P-Rem	mg/L	Metodologia de Silva et al. (2009)	Silva et al. (2009)
S, Arg, Ag, Af	kg/kg	Análise granulométrica	Claessen et al. (1997)
MO	dag/kg	Método de Walkley & Black	Walkley; Black (1934)
P, K	mg/dm ³	Extrator Mehlich-1	Mehlich (1953)

U = teor de água no solo; CRA = capacidade de retenção de água no solo, até o potencial matricial de 10 kPa; Ca²⁺ = teor de cálcio trocável no solo; Mg²⁺ = teor de magnésio trocável no solo; Al³⁺ = teor de alumínio trocável no solo; H+Al = acidez potencial; pH = potencial hidrogeniônico; P-Rem = fósforo remanescente; S = teor de silte; Arg = teor de argila; Ag = teor de areia grossa; Af = teor de areia fina; MO = teor matéria orgânica; P = teor de fósforo; K = teor de potássio.

Outros atributos do solo foram estimados a partir dos atributos descritos na Tabela 3.2. A soma de bases trocáveis (SB) corresponde à soma dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺. A capacidade de troca catiônica efetiva (t) corresponde a soma de SB com o teor de Al³⁺. A capacidade de troca catiônica total a pH 7,0 (T) corresponde à soma de SB com a acidez potencial (H+Al). A percentagem de saturação por bases (V) expressa o percentual dos locais do solo com carga negativa que estão neutralizados com cátions básicos, como Ca²⁺, K⁺ e Mg²⁺ (WEIL; BRADY, 2016), e foi calculada por meio da Equação 3.2 (EMBRAPA, 2017). Já a percentagem de saturação por alumínio (m) expressa o percentual dos locais do solo com carga negativa que estão neutralizados com íons de Al³⁺ (WEIL; BRADY, 2016), e foi calculado por meio da Equação 3.3 (EMBRAPA, 2017).

$$V = \frac{100 \text{ SB}}{T} \quad (3.2)$$

Em que:

- V = Percentagem de saturação por bases (%);
 SB = Soma de bases trocáveis (cmol_c/dm³);
 T = Capacidade de troca catiônica total (cmol_c/dm³).

$$m = \frac{100 \text{ Al}^{3+}}{\text{SB} + \text{Al}^{3+}} \quad (3.3)$$

Em que:

m = Percentagem de saturação por alumínio (%);

Al^{3+} = Teor de alumínio trocável no solo ($cmol_c/dm^3$).

3.2.4 Análises estatísticas

A influência da frequência do sinal de corrente elétrica sobre o valor obtido pelo sensor foi analisada por meio de regressões lineares seguidas pelo teste F ($p \leq 0,05$). Para isso, foram realizadas regressões lineares, para cada ponto e em todas as áreas, entre a frequência do sinal (variável independente) e a CE_a média (variável dependente). A CE_a média é equivalente à média aritmética das dez mensurações de CE_a para seu respectivo ponto experimental e frequência de sinal. Neste sentido, o teste F buscou avaliar se as inclinações das linhas de regressão obtidas foram iguais (não há influência da frequência) ou diferentes (há influência da frequência) de zero.

Correlações de Pearson (r) ($p \leq 0,05$) foram calculadas, de forma a quantificar as relações entre CE_a e os atributos físicos e químicos do solo, para cada frequência do sinal de corrente elétrica do sensor. Para isso, os valores médios de CE_a , para todas as frequências em todos os pontos experimentais, foram calculados. Com base na significância e no número das correlações encontradas, foram avaliadas as frequências de corrente elétrica que mais se correlacionaram com os atributos do solo. Neste sentido, o teste de qui-quadrado ($p \leq 0,05$) foi utilizado para avaliar se a frequência de correlações significativas foi homogênea em todas as frequências de corrente elétrica testadas. Especificamente, buscou-se identificar a frequência de corrente elétrica com mais correlações com os atributos do solo.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Avaliação da influência da frequência nos valores de CE_a

Nas Tabelas 3.3 e 3.4 são apresentadas as estatísticas descritivas dos atributos físicos e químicos do solo para as áreas experimentais A1 e A2 e para A3 e A4, respectivamente. Os teores de Al^{3+} e m da área A2 e teores de P na área A4 apresentaram elevada variabilidade com coeficientes de variação (CV) maiores que 50%. Os demais atributos do solo apresentaram baixa ou média variabilidade, com coeficientes de variação menores que 50%, em todas as áreas.

As áreas A2 e A3 apresentaram valores médios de CE_a semelhantes entre si (Tabelas 3.3 e 3.4). A maior diferença entre valores médios de CE_a foi observada entre as áreas A1 ($CE_a < 11$ mS/m) e A4 ($CE_a > 15$ mS/m) (Tabelas 3.3 e 3.4). Além disso, as áreas apresentaram diferentes valores de CV para CE_a , sendo que os menores valores de CV foram observados nas áreas A3 e A4. Entretanto, nenhuma tendência entre as frequências do sinal do sensor e os valores de CV foi observada. Isso se deve principalmente ao fato de as frequências em estudo estarem localizadas em uma faixa inferior a 100 Hz (LÜCK; RÜHLMANN, 2010, 2013). Lück e Rühlmann (2013), utilizando um sensor de múltiplas frequências que opera pelo método da resistividade elétrica, constataram que o uso de frequências na faixa de 62,5 a 562,5 Hz não afetou os valores de resistividade do solo obtidos. Os testes feitos pelos autores mostraram que o ruído no sinal do sensor era maior em frequências mais baixas. No presente trabalho, não foi encontrado nenhum efeito da frequência do sinal no coeficiente de variação; isso significa que o ruído no sinal do sensor pode ser semelhante para todas as frequências usadas. Utilizamos frequências em uma faixa inferior à utilizada por Lück e Rühlmann (2013). Além disso, o sensor utilizado pelos autores possui um arranjo do tipo dipolo-dipolo e o sensor utilizado no presente trabalho utiliza o arranjo do tipo Wenner. As diferenças no projeto do sensor e nas condições do solo podem ser a razão da diferença entre os resultados.

Tabela 3.3. Estatísticas descritivas dos atributos do solo estudados nas áreas A1 e A2.

Atributos do solo	Área 1						Área 2					
	Mín	Máx	P5	P95	Média	CV (%)	Mín	Máx	P5	P95	Média	CV (%)
CE_{a1} (mS/m)	6,11	13,26	6.47	12.35	8,95	29,45	6,08	16,84	7,44	16.63	13,02	32,28
CE_{a5} (mS/m)	6,49	15,17	6.97	14.05	9,88	32,38	4,96	16,42	6,39	16.40	12,60	37,12
CE_{a10} (mS/m)	5,75	12,71	6.03	11.92	8,62	30,24	3,27	17,03	5,35	16.47	12,41	42,61
CE_{a20} (mS/m)	8,29	15,22	8.42	14.68	10,99	26,04	2,95	17,42	4,89	17.27	12,55	45,99
CE_{a30} (mS/m)	6,32	14,33	6.72	13.43	9,65	30,56	5,91	16,01	7.03	15.88	12,46	32,57
CE_{a40} (mS/m)	7,22	11,44	7.37	10.89	8,79	18,17	6,08	16,34	7.66	16.27	13,54	31,51
pH	5,71	6,72	5.75	6.65	6,21	5,75	4,98	5,73	5.01	5.68	5,34	4,95
P (mg/dm ³)	0,90	6,10	1.20	5.78	3,62	49,64	17,40	52,30	19.68	50.98	35,84	34,36
K (mg/dm ³)	85,00	294,00	96.20	271.40	172,00	40,00	151,00	226,00	151.80	217.40	176,00	15,53
Ca ²⁺ (cmolc/dm ³)	1,47	2,89	1.56	2.89	2,23	25,17	2,44	3,59	2.46	3.59	3,09	16,29
Mg ²⁺ (cmolc/dm ³)	0,43	0,59	0.44	0.58	0,52	11,41	0,64	1,04	0.65	1.03	0,81	20,75
Al ³⁺ (cmolc/dm ³)	0,00	0,00	0.00	0.00	0,00	-	0,00	0,28	0.00	0.26	0,11	97,71
H+Al (cmolc/dm ³)	1,40	2,30	1.46	2.28	1,90	17,30	4,20	6,10	4.38	6.10	5,40	13,15
SB (cmolc/dm ³)	2,16	4,20	2.27	4.12	3,19	23,23	3,47	5,21	3.50	5.18	4,36	16,43

t (cmolc/dm ³)	2,16	4,20	2,27	4,12	3,19	23,23	3,66	5,21	3,71	5,18	4,47	13,72
T (cmolc/dm ³)	4,46	5,60	4,55	5,58	5,09	8,32	8,57	10,55	8,74	10,55	9,76	7,63
V (%)	48,40	75,00	49,72	73,84	61,88	15,41	37,20	55,40	37,86	53,90	44,62	14,36
m (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	7,20	0,00	6,80	2,88	99,92
MO (dag/kg)	1,71	2,50	1,74	2,47	2,11	14,28	2,50	3,69	2,58	3,66	3,24	14,27
P-Rem (mg/L)	23,10	26,10	23,18	26,10	24,82	5,16	25,40	28,20	25,54	28,14	26,90	3,93
Ag (kg/kg)	0,22	0,25	0,22	0,24	0,23	3,89	0,10	0,29	0,11	0,27	0,18	33,43
Af (kg/kg)	0,15	0,18	0,15	0,17	0,16	6,88	0,12	0,15	0,12	0,15	0,14	8,40
S (kg/kg)	0,09	0,11	0,09	0,11	0,10	6,49	0,10	0,20	0,10	0,19	0,14	25,61
Arg (kg/kg)	0,51	0,52	0,51	0,52	0,51	0,82	0,46	0,58	0,47	0,58	0,54	8,27
CRA (kg/kg)	0,31	0,36	0,31	0,36	0,33	5,69	0,30	0,43	0,32	0,43	0,39	12,14
U (% b.s.)	22,86	26,16	23,12	25,99	24,54	4,57	21,46	34,65	22,88	34,40	29,54	15,68

Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; P5 = percentil 5%; P95 = percentil 95%; CV (%) = coeficiente de variação, em porcentagem; CE_{a1}, CE_{a5}, CE_{a10}, CE_{a20}, CE_{a30} e CE_{a40} = condutividade elétrica aparente do solo para as frequências de corrente elétrica de 1, 5, 10, 20, 30 e 40 Hz, respectivamente; U = teor de água no solo; CRA = capacidade de retenção de água no solo, até o potencial matricial de 10 kPa; Ca²⁺ = teor de cálcio trocável no solo; Mg²⁺ = teor de magnésio trocável no solo; Al³⁺ = teor de alumínio trocável no solo; H+Al = acidez potencial; pH = potencial hidrogeniônico; P-Rem = fósforo remanescente; S = teor de silte; Arg = teor de argila; Ag = teor de areia grossa; Af = teor de areia fina; MO = teor matéria orgânica; P = teor de fósforo; K = teor de potássio; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total; V = percentagem de saturação por bases; m = percentagem de saturação por alumínio.

Tabela 3.4. Estatísticas descritivas dos atributos do solo estudados nas áreas A3 e A4.

Atributos do solo	Área 3						Área 4					
	Mín	Máx	P5	P95	Média	CV (%)	Mín	Máx	P5	P95	Média	CV (%)
CE _{a1} (mS/m)	8,42	13,97	8,64	13,59	11,08	19,68	12,57	18,52	12,95	18,09	15,36	14,48
CE _{a5} (mS/m)	9,47	12,16	9,55	12,15	10,90	11,42	12,18	17,70	12,58	17,39	15,05	13,77
CE _{a10} (mS/m)	9,79	13,07	9,91	12,81	11,31	11,31	12,06	18,79	13,00	18,43	16,27	15,38
CE _{a20} (mS/m)	9,79	12,32	10,03	12,22	11,24	8,54	13,40	19,84	13,82	19,34	16,57	14,32
CE _{a30} (mS/m)	10,67	12,24	10,68	12,21	11,43	6,44	12,78	17,77	13,47	17,74	16,26	12,55
CE _{a40} (mS/m)	10,37	13,40	10,57	13,26	11,96	9,77	13,34	20,83	14,00	20,43	17,69	16,11
pH	5,12	5,80	5,15	5,77	5,47	4,45	5,79	6,88	5,82	6,85	6,34	6,73
P (mg/dm ³)	6,40	21,90	6,82	20,62	12,92	42,35	6,30	33,50	6,76	31,52	18,98	53,53
K (mg/dm ³)	87,00	173,00	95,40	165,80	131,40	20,81	69,00	139,00	69,80	132,20	97,40	25,99
Ca ²⁺ (cmolc/dm ³)	1,91	3,89	2,06	3,75	2,88	22,52	4,05	5,16	4,10	5,13	4,62	9,09
Mg ²⁺ (cmolc/dm ³)	0,45	0,94	0,47	0,91	0,70	24,81	0,79	1,44	0,82	1,41	1,12	20,49
Al ³⁺ (cmolc/dm ³)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
H+Al (cmolc/dm ³)	2,70	4,20	2,76	3,96	3,18	16,45	1,10	4,40	1,26	4,18	2,54	45,95
SB (cmolc/dm ³)	2,81	4,92	2,96	4,83	3,91	18,62	5,11	6,81	5,17	6,77	6,00	10,95
t (cmolc/dm ³)	2,81	4,92	2,96	4,83	3,91	18,62	5,11	6,81	5,17	6,77	6,00	10,95
T (cmolc/dm ³)	5,51	9,12	5,72	8,79	7,09	16,80	7,32	10,44	7,40	10,11	8,54	12,70
V (%)	51,00	59,70	51,58	58,96	54,98	5,19	57,90	85,70	58,48	84,02	71,14	14,61

m (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
MO (dag/kg)	1,71	3,29	1,79	3,11	2,34	22,28	2,90	4,48	2,95	4,37	3,56	16,24
P-Rem (mg/L)	14,50	31,50	14,74	29,98	20,44	31,46	21,80	29,00	22,36	28,74	26,12	9,93
Ag (kg/kg)	0,11	0,24	0,11	0,22	0,14	35,39	0,14	0,20	0,15	0,19	0,17	11,06
Af (kg/kg)	0,11	0,18	0,11	0,18	0,13	21,22	0,10	0,15	0,11	0,15	0,13	11,60
S (kg/kg)	0,08	0,24	0,08	0,24	0,16	40,98	0,10	0,13	0,10	0,13	0,11	12,35
Arg (kg/kg)	0,48	0,71	0,49	0,68	0,56	13,86	0,54	0,62	0,55	0,62	0,59	5,11
CRA (kg/kg)	0,31	0,43	0,33	0,42	0,39	10,63	0,39	0,42	0,39	0,42	0,41	2,38
U (% b.s.)	19,80	29,43	21,24	29,30	26,68	13,24	33,83	39,20	34,15	39,11	36,98	5,54

Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; P5 = percentil 5%; P95 = percentil 95%; CV (%) = coeficiente de variação, em porcentagem; CE_a1, CE_a5, CE_a10, CE_a20, CE_a30 e CE_a40 = condutividade elétrica aparente do solo para as frequências de corrente elétrica de 1, 5, 10, 20, 30 e 40 Hz, respectivamente; U = teor de água no solo; CRA = capacidade de retenção de água no solo, até o potencial matricial de 10 kPa; Ca²⁺ = teor de cálcio trocável no solo; Mg²⁺ = teor de magnésio trocável no solo; Al³⁺ = teor de alumínio trocável no solo; H+Al = acidez potencial; pH = potencial hidrogeniônico; P-Rem = fósforo remanescente; S = teor de silte; Arg = teor de argila; Ag = teor de areia grossa; Af = teor de areia fina; MO = teor matéria orgânica; P = teor de fósforo; K = teor de potássio; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total; V = percentagem de saturação por bases; m = percentagem de saturação por alumínio.

Na Figura 3.3 são apresentados os gráficos de *Box-plot* da condutividade elétrica aparente do solo nos cinco pontos experimentais, para cada uma das quatro áreas em que as determinações foram realizadas utilizando as seis diferentes frequências de corrente elétrica aplicada ao solo pelo sensor. Para a maioria dos pontos experimentais, observou-se que os valores de CE_a apresentaram dispersões semelhantes nas seis frequências de corrente elétrica estudadas. No entanto, foi observada uma grande dispersão nas leituras de CE_a para o ponto experimental dois da área A2 (Figura 3.3b). Para melhor entender a dispersão observada na Figura 3.3, a Tabela 3.5 apresenta os valores médios de U e SB para todos os pontos experimentais. Essas variáveis foram escolhidas devido à sua relação direta com a CE_a (ALLRED et al., 2008; CORWIN; LESCH 2005).

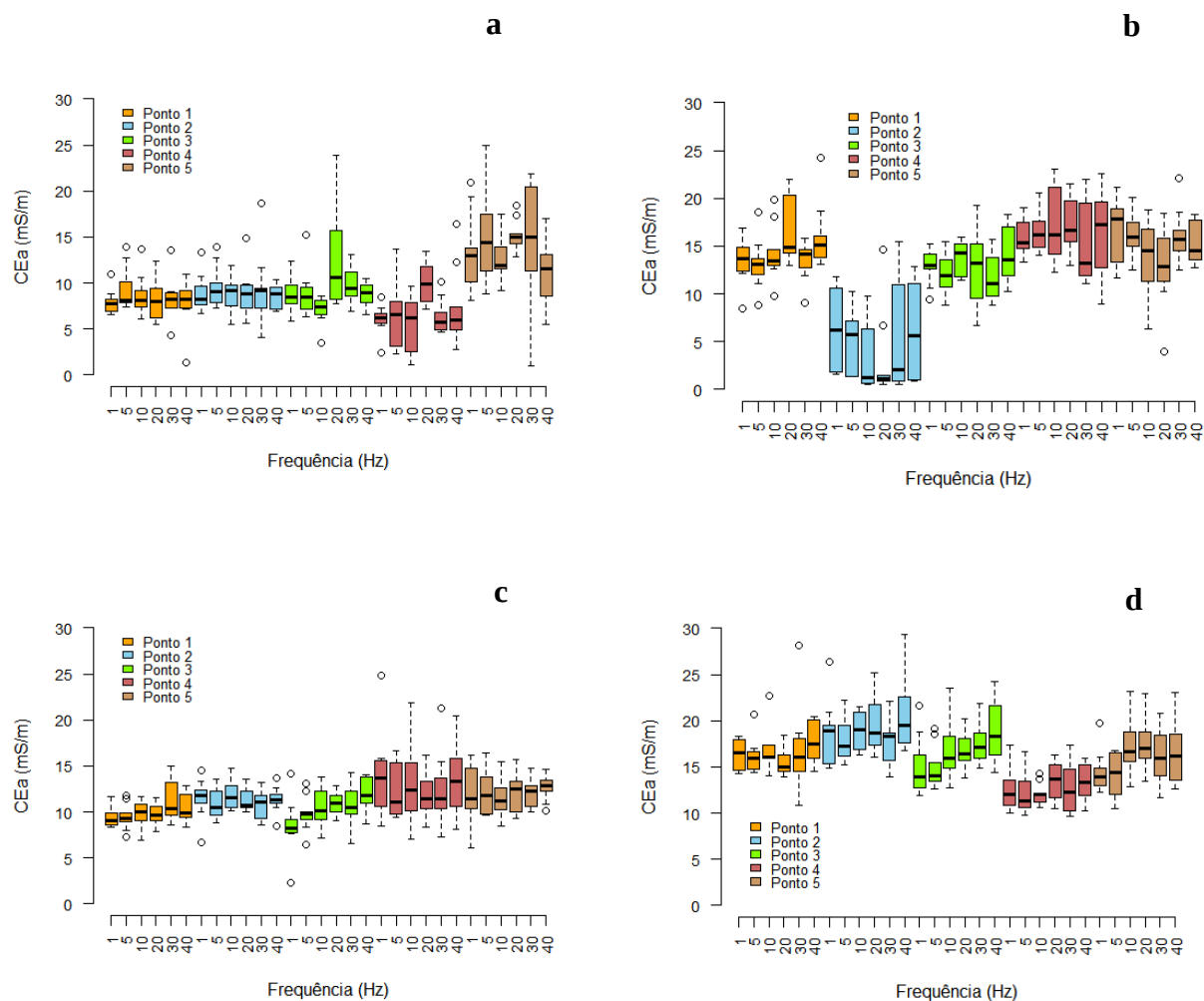


Figura 3.3. Gráfico de *Box-plot* das medidas de CE_a e suas respectivas frequências para os pontos experimentais 1, 2, 3, 4 e 5 das áreas A1 (a), A2 (b), A3 (c) e A4 (d).

Tabela 3.5. Valores médios do teor de água no solo e soma de bases trocáveis para todos os pontos experimentais.

Áreas	Pontos	U (% b.s.)	SB (cmolc/dm ³)	Áreas	Pontos	U (% b.s.)	SB (cmolc/dm ³)
A1	P1	24,18	2,69	A3	P1	28,79	2,81
	P2	25,31	3,82		P2	28,38	3,56
	P3	26,16	3,07		P3	19,80	4,45
	P4	24,21	2,16		P4	29,43	4,92
	P5	22,86	4,20		P5	27,01	3,82
A2	P1	33,39	5,21	A4	P1	39,20	5,11
	P2	21,46	3,47		P2	38,76	5,42
	P3	28,55	3,61		P3	37,69	6,04
	P4	34,65	5,05		P4	35,41	6,61

P5	29,65	4,44	P5	33,83	6,81
----	-------	------	----	-------	------

SB = soma de bases trocáveis; U = teor de água no solo.

Como a CE_a e o teor de água no solo geralmente apresentam forte correlação (MISRA; PADHI, 2014; MOLIN; FAULIN, 2013; ROBINSON et al., 2009), a dispersão observada na Figura 3.3b pode ser devida à diferença observada do teor de água no solo entre os pontos da área A2 (Tabela 3.5). Devido a presença de diferentes sistemas de preparo de solo na área A2, a variação da camada de cobertura do solo teve influência direta na variação do teor de água no solo, que por sua vez pode ter contribuído para a maior dispersão nos valores de CE_a em relação às demais áreas. Diferenças na amplitude dos valores de CE_a , causadas principalmente pela variação do teor de água no solo, também foram observadas em outros estudos (LESCH et al., 2005; STADLER et al., 2015).

A Tabela 3.6 apresenta as análises de regressão entre a frequência da corrente elétrica e a CE_a do sensor em cada um dos pontos amostrados em cada uma das áreas (A1, A2, A3 e A4). Com base no teste F ($p \leq 0,05$), verificou-se que a frequência da corrente elétrica teve efeito significativo na CE_a apenas para o ponto experimental P3 na área A3 e para o ponto experimental P3 na área A4. Esses resultados significativos podem ser atribuídos à interferência de fatores não controlados, como a diferença de temperatura do solo (CORWIN; LESCH, 2005) entre os pontos experimentais, a heterogeneidade dos atributos do solo dentro de um mesmo ponto experimental ou erros experimentais. Visto que não houve variação do teor de água no solo dentro dos pontos experimentais, sua interferência nos valores de CE_a (LESCH et al., 2005; STADLER et al., 2015) pode ser descartada.

Tabela 3.6. Análises de regressão entre a frequência da corrente elétrica e a CE_a do sensor em cada um dos pontos amostrados em cada uma das áreas (A1, A2, A3 e A4).

Áreas	Pontos	R ²	F	p – valor	Áreas	Pontos	R ²	F	p – valor
A1	P1	0,178	0,865	0,405	A3	P1	0,562	5,137	0,086
	P2	0,028	0,117	0,750		P2	0,064	0,273	0,629
	P3	0,059	0,249	0,644		P3	0,783	14,430 ^a	< 0,05
	P4	0,085	0,373	0,575		P4	0,022	0,089	0,780
	P5	0,142	0,663	0,461		P5	0,444	3,189	0,149
A2	P1	0,305	1,756	0,256	A4	P1	0,474	3,611	0,130
	P2	0,059	0,251	0,643		P2	0,334	2,009	0,229

P3	0,022	0,089	0,780	P3	0,912	41,475 ^a	< 0,05
P4	0,013	0,052	0,831	P4	0,505	4,088	0,113
P5	0,048	0,201	0,677	P5	0,368	2,333	0,201

^a Denota a significância do teste F ($p \leq 0,05$).

Na literatura, não há estudos que se aprofundem a respeito da existência da relação entre a frequência de corrente elétrica e a CE_a , em sensores que operam pelo método da resistividade elétrica. Já para os sensores que operam pelo método da indução eletromagnética, ao contrário do que foi constatado no presente trabalho, estudos apontam a existência dessa relação (CALAMITA et al., 2015; TROMP-VAN MEERVELD; MCDONNELL, 2009). Tromp-Van Meerveld e McDonnell (2009) constataram a existência de fortes relações lineares ($R^2 > 0,75$) entre os valores de CE_a medidos para as diferentes frequências, na faixa entre 7,29 e 14,01 kHz.

3.3.2 Avaliação da correlação entre CE_a e atributos físicos e químicos do solo para diferentes frequências

Nas Figuras 3.4 e 3.5 são apresentadas as matrizes das correlações significativas de Pearson para os atributos químicos e físicos do solo e entre as mensurações de CE_a e os atributos do solo em estudo, respectivamente. As matrizes de correlação foram calculadas considerando os valores das variáveis em todos os pontos experimentais, para todas as áreas. Foram encontradas correlações positivas e significativas entre CE_a e Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB, t, MO, Arg, CRA e U, para todas as frequências. Correlações negativas e significativas foram obtidas entre CE_a e Ag, para todas as frequências (Figura 3.5).

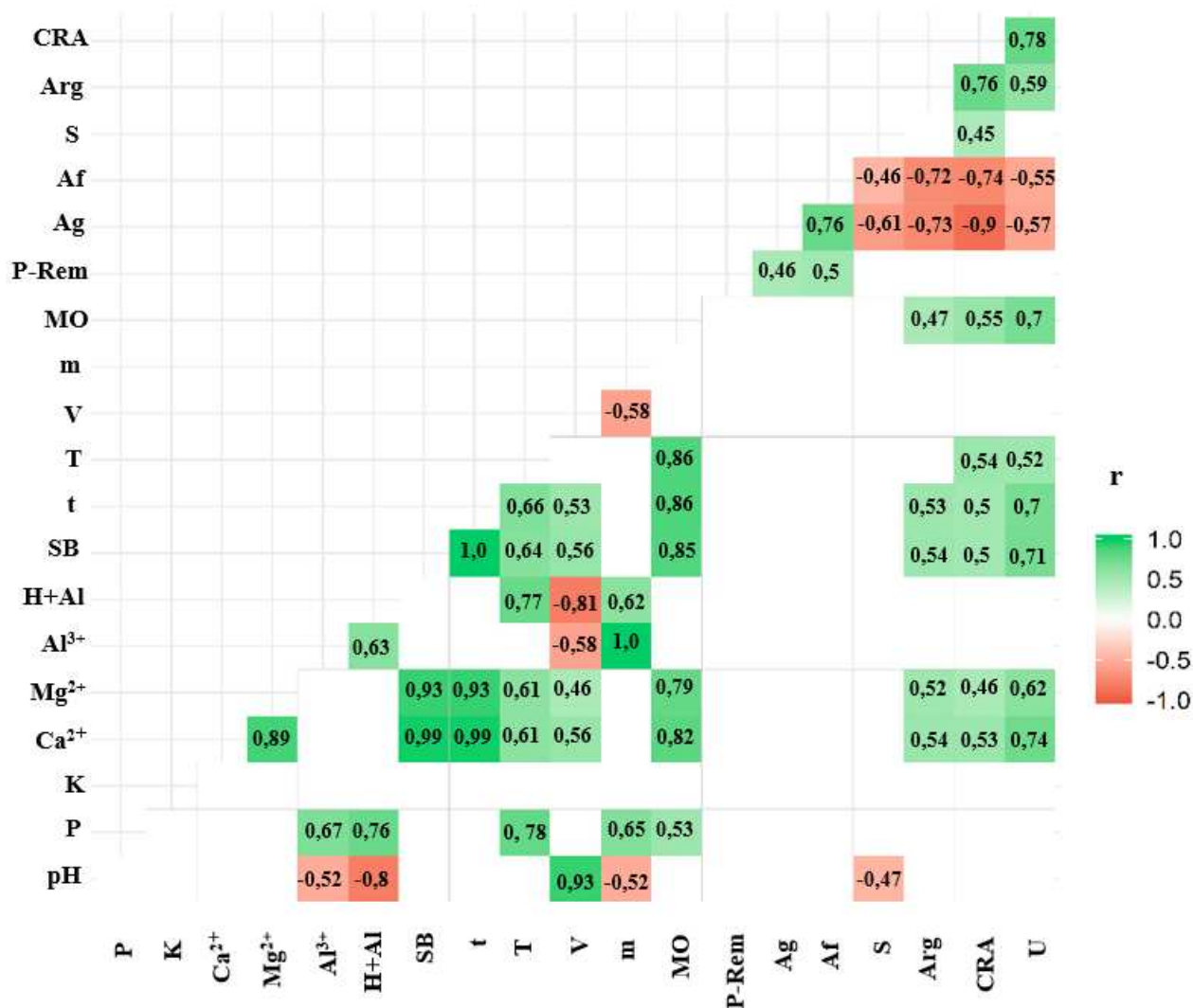


Figura 3.4. Matriz de correlação de Pearson calculada para os atributos químicos e físicos do solo.

U = teor de água do solo; CRA = capacidade de retenção de água no solo, até o potencial matricial de 10 kPa; Ca²⁺ = teor de cálcio trocável no solo; Mg²⁺ = teor de magnésio trocável no solo; Al³⁺ = teor de alumínio trocável no solo; H+Al = acidez potencial; pH = potencial hidrogeniônico; P-Rem = fósforo remanescente; S = teor de silte; Arg = teor de argila; Ag = teor de areia grossa; Af = teor de areia fina; MO = teor matéria orgânica; P = teor de fósforo; K = teor de potássio; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total; V = percentagem de saturação por bases; m = percentagem de saturação por alumínio.

Correlação é significativa ao nível de 5% de significância.

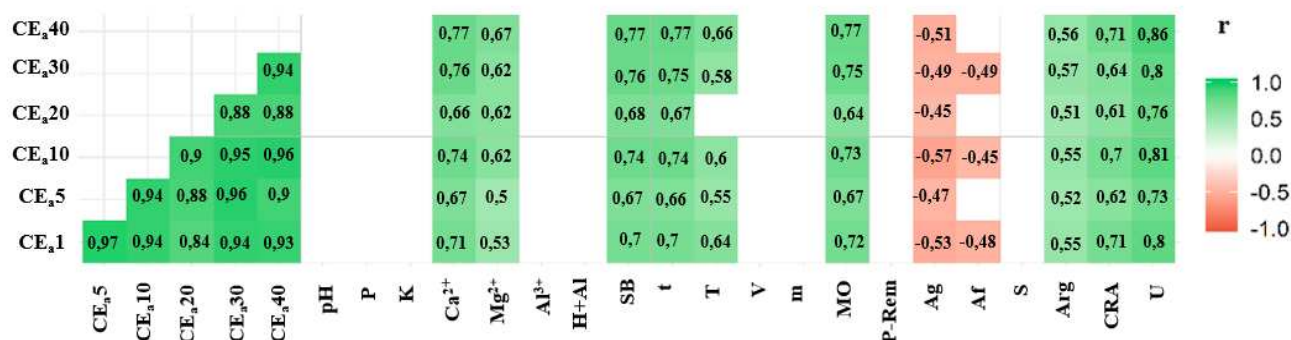


Figura 3.5. Matriz de correlação de Pearson calculada para a condutividade elétrica aparente do solo e os atributos do solo.

CE_a1, CE_a5, CE_a10, CE_a20, CE_a30 e CE_a40 = condutividade elétrica aparente do solo para as frequências de corrente elétrica de 1, 5, 10, 20, 30 e 40 Hz, respectivamente; U = teor de água do solo; CRA = capacidade de retenção de água no solo, até o potencial matricial de 10 kPa; Ca²⁺ = teor de cálcio trocável no solo; Mg²⁺ = teor de magnésio trocável no solo; Al³⁺ = teor de alumínio trocável no solo; H⁺Al = acidez potencial; pH = potencial hidrogeniônico; P-Rem = fósforo remanescente; S = teor de silte; Arg = teor de argila; Ag = teor de areia grossa; Af = teor de areia fina; MO = teor matéria orgânica; P = teor de fósforo; K = teor de potássio; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total; V = percentagem de saturação por bases; m = percentagem de saturação por alumínio.

Correlação é significativa ao nível de 5% de significância.

Correlações entre CE_a e cátions trocáveis

Correlações fortemente positivas e significativas ($r \geq 0,7$) foram encontradas entre CE_a e Ca²⁺, SB e t, todos para as frequências de 1, 10, 30 e 40 Hz. Entre a CE_a e Mg²⁺, correlações significativas ($0,5 < r < 0,67$) foram encontradas para todas as frequências. Já entre CE_a e T, somente para a frequência de 20 Hz, não houve correlação significativa (Figura 3.5). Tais resultados corroboram com trabalhos na literatura que reportaram a existência de correlação significativa entre CE_a e cátions trocáveis (Ca²⁺ e Mg²⁺) (COSTA et al., 2014; SANA et al., 2014). Tal correlação se deve, principalmente, ao fato de cátions trocáveis, localizados na superfície do solo, conduzirem corrente elétrica (CORASSA et al., 2016).

Correlações entre CE_a e CRA e teor de água no solo

As variáveis CE_a e CRA apresentaram correlações significativas entre si, para todas as frequências. No entanto, relações fortemente positivas ($r \geq 0,7$) foram encontradas apenas nas frequências de 1, 10 e 40 Hz. Já as variáveis CE_a e teor de água no solo apresentaram correlações fortemente positivas e significativas entre si ($r > 0,7$), para todas as frequências estudadas (Figura 3.5).

Alguns relatos também atestaram para a existência de correlação significativa entre CRA e CE_a (LO et al., 2017; MARTÍNEZ-CASASNOVAS et al., 2017). Isso se deve ao fato da CRA se relacionar com teor de argila no solo (RAWLS et al., 2003), que por sua vez está associado aos cátions trocáveis. Os cátions trocáveis possuem relação direta com a CE_a (CORWIN; LESCH, 2003; CORASSA et al., 2016).

A CE_a é uma função resposta do teor de água no solo (MISRA; PADHI, 2014; MOLIN; FAULIN, 2013; ROBINSON et al., 2009), o que explica a significância das correlações encontradas neste trabalho e em relatos prévios (COSTA et al., 2014; KÄTHNER et al., 2017; TSOULIAS et al., 2018).

Correlações entre CE_a e matéria orgânica

O teor de matéria orgânica presente no solo e os valores de CE_a apresentaram correlações significativas para todas as frequências estudadas. Somente para as frequências de 1, 10, 30 e 40 Hz, essas variáveis mostraram-se fortemente correlacionadas ($r > 0,7$) (Figura 3.5). Isso pode ser explicado pela relação indireta entre CE_a e matéria orgânica, onde o teor de matéria orgânica influencia o grau de saturação do solo, além de fornecer um caminho de condutância principalmente por meio de cátions trocáveis (ALLRED et al., 2008; FONTANA et al., 2014; MINASNY; MCBRATNEY, 2018). Os resultados apresentados na Figura 3.4 comprovam essa relação, sendo a matéria orgânica fortemente correlacionada com cátions trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e teor de água ($r > 0,7$). Tanto os cátions trocáveis quanto o teor de água apresentaram correlações significativas com os valores de CE_a .

Estudos na literatura mostraram-se divididos em relação a existência de correlação significativa entre CE_a e matéria orgânica, com alguns relatando sua existência (VALENTE et al., 2012; MACHADO et al., 2015) e outros relatando a inexistência de significância (SANA et al., 2014; SANCHES et al., 2018). Entretanto, devido à relação indireta do teor de matéria orgânica com a CE_a , a variação de outros fatores que possuem relação direta com a CE_a podem ter sido a causa da diferença entre esses resultados.

Correlações entre CE_a e textura do solo

Correlações negativas e significativas ($r \leq -0,47$) foram encontradas entre CE_a e teor de areia grossa no solo, para todas as frequências estudadas (Figura 3.5). Entre a CE_a e teor de areia fina, correlações negativas e significativas ($r \leq -0,36$) foram

encontradas para as frequências de 1, 10 e 30 Hz. As demais frequências não apresentaram correlações significativas (Figura 3.4). Entre a CE_a e teor de argila, correlações positivas e significativas ($r \geq 0,51$) foram para todas as frequências estudadas (Figura 3.5). Tais correlações podem ser explicadas pela relação indireta entre a CE_a e a textura do solo. O teor de argila influencia o grau de saturação do solo, além de fornecer um caminho de condutância na fase sólido-líquido principalmente por meio de cátions trocáveis (ALLRED et al., 2008); e o teor de areia é inversamente relacionado com o teor de água no solo (KORSAETH, 2008). Os resultados apresentados na Figura 3.4 comprovam essa relação, onde o teor de argila apresentou correlações positivas e significativas com o teor de água no solo e cátions trocáveis, e o teor de areia apresentou correlações negativas e significativas com o teor de água no solo. Por sua vez, a CE_a apresentou correlações significativas e positivas com os cátions trocáveis e o teor de água no solo.

Os resultados confirmam descobertas de estudos prévios que relataram a existência de correlações significativas entre CE_a e teor de areia (SIRI-PRIETO et al., 2006; GHOLIZADEH et al., 2012), e CE_a e teor de argila (GHOLIZADEH et al., 2012; CORWIN; LESCH, 2013; SANCHES et al., 2018). Entretanto, correlações entre CE_a e teor de areia fina não foram significativas para as frequências de 5, 20 e 40 Hz. Isso se deve, principalmente, ao fato de os pontos amostrais possuírem uma composição de solo semelhante, resultando em um baixo alcance dos dados de teor de areia fina presente no solo (Tabelas 3.3 e 3.4). Situação semelhante foi observada por Stadler et al. (2015), onde não foi observada correlação significativa entre teor de argila do solo e CE_a em dois de seus campos experimentais.

3.3.3 Homogeneidade da relação entre a frequência da corrente elétrica e as propriedades do solo

A Figura 3.6 apresenta um gráfico de barras com as frequências, observadas e esperadas, do número de correlações significativas entre a CE_a e os atributos do solo em cada uma das frequências de corrente elétrica estudadas. Para as frequências de corrente elétrica de 1, 5, 10, 20, 30 e 40 Hz foram observadas 11, 10, 11, 9, 11 e 10 correlações significativas entre a CE_a e os atributos de solo estudados, respectivamente (Figura 3.5). Para o cálculo da frequência esperada do número de correlações significativas, considerou-se que o número de correlações significativas independe da

frequência de corrente elétrica utilizada para determinar a CE_a . Para isso, a frequência esperada do número de correlações para cada frequência de corrente elétrica foi equivalente à média aritmética das seis frequências observadas (Figura 3.6).

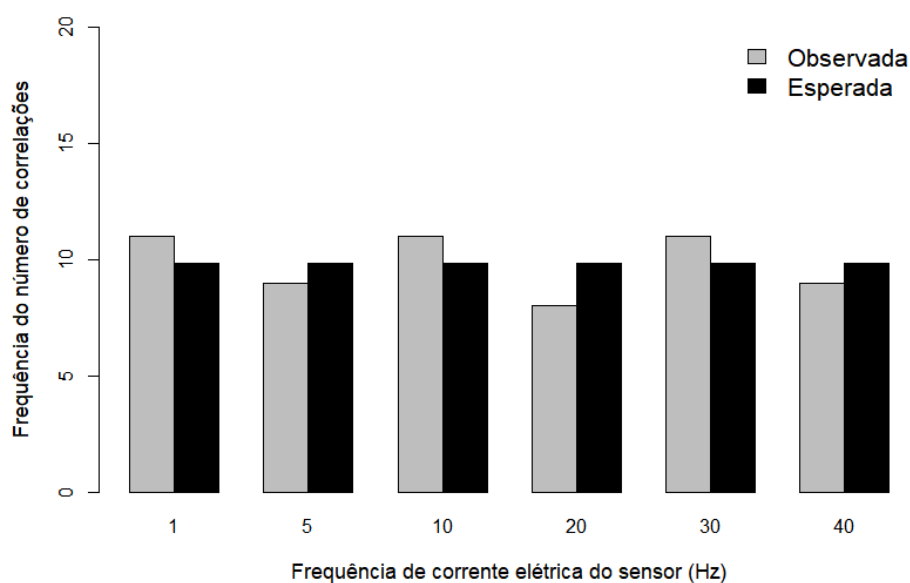


Figura 3.6. Gráfico de barras com a frequência do número de correlações de CE_a observadas e esperadas, relacionada à sua respectiva frequência de corrente elétrica do sensor, calculados para o teste estatístico qui-quadrado ($p \leq 0,05$).

De acordo com o teste de qui-quadrado, o número de correlações significativas foi homogêneo ($p \leq 0,05$) em todas as frequências de corrente elétrica. Tal resultado corrobora com o obtido pelo teste F, que aponta a inexistência do efeito da frequência de corrente elétrica na CE_a determinada pelo sensor, impossibilitando assim a determinação de uma faixa de frequência ideal, de tal forma que o valor lido pelo sensor esteja correlacionado com atributos químicos e físicos do solo.

3.4 CONCLUSÃO

Este estudo mostrou que o valor de frequência entre 1 a 40 Hz de um sensor de CE_a não interfere no valor de condutividade obtido por ele. Além disso, foi observado que o número de correlações significativas entre a CE_a e os atributos químicos e físicos do solo foram estatisticamente semelhantes em todas as frequências de corrente

elétrica, portanto, todas as frequências na faixa de 1 a 40 Hz podem ser utilizadas para correlacionar valores de CE_a com atributos químicos e físicos do solo.

3.5 REFERÊNCIAS

- ABU-HASSANEIN, Z. S.; BENSON, C. H.; BLOTZ, L. R. Electrical resistivity of compacted clays. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 5, p. 397–406, 1996.
- ADAMCHUK, V. I. et al. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71–91, 2004.
- ADAMCHUK, V. I.; ROSSEL, R. A. V. Proximal Soil Sensing. **Proximal Soil Sensing**, p. 15–28, 2010.
- ALLRED, B. J.; DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R. **Handbook of agricultural geophysics**. [s.l.] CRC Press, 2008.
- CALAMITA, G. et al. Field test of a multi-frequency electromagnetic induction sensor for soil moisture monitoring in southern Italy test sites. **Journal of Hydrology**, v. 529, n. P1, p. 316–329, 2015.
- CLAESSEN, M. E. C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. [s.l.: s.n.].
- CORASSA, G. M. et al. Espacialização em alta resolução de atributos da acidez de Latossolo por meio de sensoriamento em tempo real. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1306–1316, 2016.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture : **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455–471, 2003.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1- 3 SPEC. ISS., p. 11–43, 2005.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Protocols and Guidelines for Field-scale Measurement of Soil Salinity Distribution with ECa-Directed Soil Sampling. **Journal of Environmental & Engineering Geophysics**, v. 18, n. 1, p. 1–25, 2013.
- COSTA, M. M. et al. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 395, 2014.
- EMBRAPA. **Mapa de solos do Brasil**: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Solos, 2011.

- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Solos, 2017.
- FONTANA, A. et al. Matéria orgânica de horizontes superficiais em topolitossequências em ambiente de mar de morros, Pinheiral, RJ. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 45, n. 2, p. 221–229, 2014.
- FORTES, R. et al. and guided soil samples to improve irrigation zoning. **Precision Agriculture**, p. 441–454, 2015.
- GALUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z. M.; NAMIEŚNIK, J. Moving your laboratories to the field - Advantages and limitations of the use of field portable instruments in environmental sample analysis. **Environmental Research**, v. 140, p. 593–603, 2015.
- GHOLIZADEH, A. et al. Relationship between apparent electrical conductivity and soil physical properties in a Malaysian paddy field. **Archives of Agronomy and Soil Science**, n. November 2013, p. 37–41, 2012.
- GRISSE, R. D. et al. **Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity**. [s.l.: s.n.].
- GUNN, D. A. et al. Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. **Construction and Building Materials**, v. 92, p. 82–94, 2015.
- HERMAN, R. An introduction to electrical resistivity in geophysics. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 9, p. 943–952, 2001.
- JOHNSON, C. K.; ESKRIDGE, K. M.; CORWIN, D. L. Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3, p. 181–202, 2005.
- JUNG, W. K. et al. Relationship of apparent soil electrical conductivity to claypan soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 3, p. 883–892, 2005.
- KÄTHNER, J. et al. Evaluating spatially resolved influence of soil and tree water status on quality of European plum grown in semi-humid climate. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. June, p. 1–10, 2017.

KORSAETH, A. Dependence of Soil Apparent Electrical Conductivity (ECa) upon Soil Texture and Ignition Loss at Various Depths in Two Morainic Loam Soils in Southeast Norway. In ALLRED, B. J.; DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R. (Ed.). **Handbook of agricultural geophysics**. P.217-222. Boca Raton, FL - USA: CRC Press, 2008.

LESCH, S. M.; CORWIN, D. L.; ROBINSON, D. A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1- 3 SPEC. ISS., p. 351–378, 2005.

LO, T. et al. Field characterization of field capacity and root zone available water capacity for variable rate irrigation. **Applied engineering in agriculture**, v. 33, n. 4, p. 559–572, 2017.

LÜCK, E.; RÜHLMANN, J. **G EOPHILUS ELECTRICUS – a new soil mapping system**. International Conference on Agricultural Engineering-AgEng 2010: towards environmental technologies. **Anais...**Clermont-Ferrand, France: 2010

LÜCK, E.; RÜHLMANN, J. Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS — Information about lateral and vertical soil heterogeneity. **Geoderma**, v. 199, p. 2–11, 2013.

MACHADO, F. C. et al. Spatial Dependence of Electrical Conductivity and Chemical Properties of the Soil by Electromagnetic Induction. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1112–1120, 2015.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. et al. Combined use of remote sensing and soil sensors to detect variability in orchards with previous changes in land use and landforms: consequences for management. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 492–497, 2017.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na, NH₄**. Raleigh, North Carolina: [s.n.].

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 39–47, 2018.

MISRA, R. K.; PADHI, J. Assessing field-scale soil water distribution with

- electromagnetic induction method. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 200–209, 2014.
- MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 1, p. 1–5, 2013.
- OATES, M. J.; DE LEON, A. L. V.; EDWARDS, N. M. **A minimal cost, soil moisture measurement system: Logging wenner array resistivity with a microcontroller for less than 10 Euros**. SENSORNETS 2014 - Proceedings of the 3rd International Conference on Sensor Networks. **Anais...**2014
- QUEIROZ, D. M. et al. Development and test of a low cost portable soil apparent electrical conductivity sensor using a Beaglebone Black. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, p. 1–10, 2017.
- QUEIROZ, D. M. et al. Development and Testing of a low-Cost Portable Apparent Soil Electrical Conductivity Sensor Using a BeagleBone Black. **Applied Engineering in Agriculture**, v.35(3), p. 341-355, 2020.
- RAWLS, W. J. et al. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, v. 116, n. 1–2, p. 61–76, 2003.
- ROBINSON, D. A. et al. Time-lapse geophysical imaging of soil moisture dynamics in tropical deltaic soils: An aid to interpreting hydrological and geochemical processes. **Water Resources Research**, v. 46, n. 4, p. 1–12, 2009.
- RUDOLPH, S. et al. Linking satellite derived LAI patterns with subsoil heterogeneity using large-scale ground-based electromagnetic induction measurements. **Geoderma**, v. 241–242, p. 262–271, 2015.
- SANA, R. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 994–1002, 2014.
- SANCHES, G. M. et al. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. **Soil & Tillage Research**, v. 175, n. March 2017, p. 217–225, 2018.
- SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. Spatial and temporal patterns of apparent electrical conductivity: Dualem vs. Veris sensors for monitoring soil properties. **Sensors**, v. 14, n. 6, p. 10024–10041, 2014.
- SILVA, C. S. et al. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**.

[s.l.] EMBRAPA, 2009.

SINGH, G.; WILLIARD, K. W. J.; SCHOONOVER, J. E. Spatial relation of apparent soil electrical conductivity with crop yields and soil properties at different topographic positions in a small agricultural watershed. **Agronomy**, v. 6, n. 4, 2016.

SIRI-PRIETO, G. et al. World's oldest cotton experiment: Relationships between soil chemical and physical properties and apparent electrical conductivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 37, n. 5–6, p. 767–786, 2006.

STADLER, A. et al. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. **European Journal of Agronomy**, v. 64, p. 8–20, 2015.

SUDDUTH, K. A. et al. Modeling soil electrical conductivity-depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors. **Geoderma**, v. 199, p. 12–21, 2013.

TANG, S. et al. Modelling DUALEM-2 measured soil conductivity as a function of measuring depth to correlate with soil moisture content and potato tuber yield. **Precision Agriculture**, n. 0123456789, 2019.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.

TERRÓN, J. et al. Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. **Precision Agriculture**, p. 750–761, 2011.

TROMP-VAN MEERVELD, H. J.; MCDONNELL, J. J. Assessment of multi-frequency electromagnetic induction for determining soil moisture patterns at the hillslope scale. **Journal of Hydrology**, v. 368, n. 1–4, p. 56–67, 2009.

TSOULIAS, N. et al. **Calculating the water deficit of cherry orchard by means of spatially resolved approach**. ASABE 2018 Annual International Meeting. **Anais...**2018

VALENTE, D. S. M. et al. Relação entre condutividade elétrica aparente e propriedades do solo. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 43, n. 4, p. 683–690, 2012.

WALKLEY, A.; BLACK, A. I. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid

titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. Harlow, Essex - UK: Pearson, 2016.

4 CONCLUSÃO GERAL

Neste estudo foi possível concluir que:

- O sinal de frequência de um sensor de condutividade elétrica aparente do solo não interfere no valor obtido por ele;
- Todas as frequências na faixa de 1 a 40 Hz apresentaram a mesma relação entre a condutividade elétrica aparente do solo e os atributos químicos e físicos do solo. Foram observadas entre nove e onze correlações significativas (de um total de 20) entre a condutividade elétrica aparente do solo e os atributos do solo, para as diferentes frequências de corrente elétrica. Entretanto, não foi constatada relação entre o número de correlações significativas e as diferentes frequências.