**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Relação da condutividade elétrica aparente com algumas propriedades
físico-hídricas e com a variabilidade espacial dos solos**

Leandro Maria Gimenez

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2013**

Leandro Maria Gimenez
Engenheiro Agrônomo

**Relação da condutividade elétrica aparente com algumas propriedades físico-
hídricas e com a variabilidade espacial dos solos**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Gimenez, Leandro Maria

Relação da condutividade elétrica aparente com algumas propriedades físico-hídricas e com a variabilidade espacial dos solos / Leandro Maria Gimenez.- - Piracicaba, 2013.

120 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Resistividade elétrica 2. Sondagem 3. Método 4. Geoelétrico 5. Porosidade
6. Estratificação 7. Camada I. Título

CDD 631.41
G491r

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

Ao meu pai,

Edson Gimenez Espejo

Incentivador maior de minha vida acadêmica,
Apaixonado pela engenharia, foi grande mestre,
Doutor também foi: em hombridade, dedicação e desprendimento.

Meu grande esteio nesta caminhada terrena,

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Paulo Molin pela orientação, incentivo e dedicação que contribuíram à minha formação profissional. Pela sua confiança e compreensão nos momentos em que outras atividades tomavam tempo deste importante passo acadêmico.

À FUNDAÇÃO MT, por fomentar, e sobretudo, por acreditar, na importância da formação de seus colaboradores.

À ESALQ pela diversidade, oportunidade de crescimento e rico ambiente acadêmico, que tanto nos provoca a acreditar na construção de um Brasil melhor.

Ao professor Álvaro Pires da Silva, pelas conversas agradáveis e proveitosas e pelo apoio nas determinações físicas. Ao Jair e ao Rossi do laboratório de física do solo por seu apoio durante as determinações.

Aos colegas da pós graduação, pelos breves, porém salutares, momentos de convívio.

Ao Leandro Zancanaro, grande amigo, por seu apoio incondicional, companheirismo, dedicação, por inspirar a todos na superação de desafios.

Ao Rafael Fornari, por todo o auxílio prestado durante as etapas de campo, pela sua amizade, energia e comprometimento.

Aos estagiários e funcionários da FUNDAÇÃO MT, Lucas, Maurício, Héber, Fábio, Diego, Cairo, Marcio e Valdir, pelo auxílio e companheirismo em campo.

Aos proprietários das fazendas Guarita, N. Sra. da Salete, Cidade Verde e Santo Antônio, pelo apoio à consecução das atividades de coleta de amostras em campo.

A Thiago Romanelli, Fabrício Povh e Marcos Baldo, por sua preciosa amizade.

À minha família, minha mãe Rosana, irmãos Lucas e Luciano e irmã Livia, pelo apoio e incentivo, pelo exemplo de fé, pela disponibilidade nos momentos onde os desafios se fazem maiores. Pela fortaleza incontestável no enfrentamento de nossa grande perda em 2012 e por sua compreensão nos momentos em que não estive presente.

À minha mulher, Debora, capaz de iluminar o todo com a energia que irradia, seu amor pela vida e pelo belo. Por todos estes anos juntos e à distância, por manter acesa a chama, acreditar e incentivar a realização do doutorado.

Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Fundamentação teórica da condutividade elétrica	15
2.2 Condutividade elétrica aparente do solo	16
2.3 Métodos de mensuração da CEa	20
2.4 Relação entre propriedades do solo e CEa	26
2.5 Aplicações da CEa do solo na agricultura	27
2.6 Variabilidade espacial da CEa do solo	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Locais de estudo e estratégia de coleta de amostras	33
3.2 Instrumentos utilizados	38
3.3 Determinações em laboratório	39
3.4 Determinações referentes à CEa	41
3.5 Métodos estatísticos	52
4 RESULTADOS	59
4.1 Estatística descritiva	59
4.2 Relação entre variáveis mensuradas nas trincheiras	76
4.3 Sondagem vertical e medidas no perfil	89
4.4 Variabilidade espacial	95
5 CONSIDERAÇÕES	111
6 CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS	115

RESUMO

Relação da condutividade elétrica aparente com algumas propriedades físico-hídricas e com a variabilidade espacial dos solos

A variabilidade das propriedades físicas do solo apresenta impacto sobre o desempenho das atividades de produção agrícola. Métodos indiretos para obtenção de informações sobre as propriedades do solo com interesse agrônomo são utilizados com o intuito de favorecer o uso de insumos de modo mais adequado. A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é influenciada por diversas propriedades, muitas delas inter-relacionadas e com variabilidade em curta distância, sendo difícil a separação dos diversos fatores. As medidas de CEa são usualmente tomadas em superfície com arranjos de eletrodos para prospecção de um volume de solo proporcional à distância entre eles. Neste trabalho foi utilizada uma metodologia que permitiu identificar algumas das propriedades com maior impacto sobre a CEa, merecendo destaque aquelas relacionadas ao espaço poroso do solo. A caracterização detalhada da variação da CEa ao longo do perfil do solo e sua comparação com aquela obtida a partir da sondagem elétrica vertical permitiram identificar algumas limitações desta técnica. A presença de camadas com variação de diversas propriedades físicas e de umidade no perfil do solo alterou os valores observados em superfície. A relação entre a distância de separação dos eletrodos no arranjo com quatro pontas igualmente espaçadas, e a profundidade de prospecção, coeficiente k , oscilou entre 0,35 e 0,70 para os solos LVd, LAd e PVe avaliados. A sondagem elétrica empregada na caracterização de variabilidade espacial na horizontal e em profundidade em uma área com teores de argila oscilando entre 150 e 379 g kg⁻¹ na camada 0 a 0,2 m e entre 225 e 326 g kg⁻¹ na camada 0,6 a 0,8 m apresentou resultado satisfatório.

Palavras-chave: Resistividade elétrica; Sondagem; Método; Geoeletrico; Porosidade; Estratificação; Camada

ABSTRACT

Apparent electrical conductivity relationship with some physical properties and spatial variability in soils

The variability of soil physical properties has an impact on the performance of agricultural production activities. Indirect methods for obtaining information on the soil properties with agronomic interest are used to allow the use of inputs more appropriately. The apparent soil electrical conductivity (ECa) is influenced by several properties , many of them interrelated and presenting variability in short distances, being difficult to separate the various factors. ECa measures are usually taken in surface, using electrode arrangements for prospecting a soil volume proportional to the distance between them. In this work, a methodology was used that identified some of the properties with the greatest impact on the ECa, with emphasis to those related to soil porous space. The detailed characterization of the variation of ECw throughout the soil profile and its comparison with that obtained from the vertical electrical sounding was carried to identify certain limitations of this technique. The presence of several layers with varying physical properties and moisture in the soil profile changed values obtained from surface sounding. The relationship between the separation of the electrodes in the array with four points equally spaced, the Wenner array, and the depth of exploration, coefficient k, ranged between 0.35 and 0.70 for the soils LVd , LAd PVe and evaluated. A survey was done for the ECa characterization of spatial variability in the horizontal and along soil profile in an area with clay content ranging from 150 to 379 g kg⁻¹ in the layer from 0 to 0.2 m and between 225 and 326 g kg⁻¹ in layer 0, 6 to 0.8 m. The use of ECa for characterizing this variability showed satisfactory results.

Keywords: Electrical resistivity; Survey; Method; Electrical sounding; Porosity; Layering; Layer; Rooting zone; Surface geophysics

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial do solo é reconhecida como um dos principais causadores de variação no desempenho das plantas cultivadas e, portanto restritiva à produção agrícola eficiente nos sistemas de produção de intensidade alta. Nas últimas décadas o desenvolvimento de sistemas eletrônicos embarcados em máquinas agrícolas permitiu contornar parte dos problemas através da realização da aplicação de insumos em função das necessidades identificadas por métodos baseados, na maior parte das vezes em amostragens esparsas.

Apesar da aplicação de insumos em taxa variada estar bastante desenvolvida no que se refere às máquinas agrícolas, os métodos de mensuração da variabilidade, que originam as prescrições, ainda dependem de procedimentos de amostragem onerosos e passíveis de erros de diversas fontes. Uma alternativa ao uso da amostragem esparsa é o emprego de sistemas capazes de coletar informações de modo sistemático ao longo das áreas cultivadas permitindo uma caracterização mais adequada da continuidade espacial dos parâmetros mensurados.

A condutividade elétrica aparente, (CEa), vem sendo empregada como informação de apoio na identificação da presença de variabilidade nos solos, permitindo separar regiões com teores distintos de, principalmente, umidade e de participação de argila. O método resistivo, mais empregado por sua confiabilidade e robustez, possui limitações de uso em condições de baixa umidade do solo, ou seja, quando há elevada resistividade. Na maior parte das regiões agrícolas esta é a condição com maior oportunidade para operacionalizar a determinação. O método resistivo, com tomada de medidas a partir da superfície do solo pode ser utilizado em equipamentos móveis, permitindo a obter medidas enquanto um veículo se desloca, gerando informações detalhadas da variabilidade horizontal do solo. A medida obtida através da mensuração na superfície é resultante da interação do campo elétrico injetado por um arranjo de eletrodos com o volume de solo imediatamente abaixo, sendo o caminhar das cargas pode oscilar se houver heterogeneidade no meio, como por exemplo a presença de estratificação, i.e., camadas com características diversas como, por exemplo, variações da composição granulométrica, mineralógica, estrutura, química e umidade, ao longo do perfil.

Um dos pressupostos para caracterizar a CEa de um meio é que haja homogeneidade em sua composição. Esta homogeneidade permite aderência do comportamento observado àquele previsto na teoria dos campos elétricos. A falta de homogeneidade também pode ser caracterizada pela sondagem elétrica, através de sucessivas alterações na disposição do arranjo de eletrodos na superfície. Esta aplicação é bastante comum em geofísica, requerendo,

entretanto o uso de grande número de eletrodos e de métodos matemáticos como a solução de problemas inversos, uma estratégia incompatível com as aplicações agrícolas.

O desconhecimento da estratificação do solo, plano vertical, pelo uso de um espaçamento fixo entre eletrodos para viabilizar a determinação de modo dinâmico, pode levar a interpretações inadequadas quanto à variabilidade no plano horizontal.

Por outro lado, os instrumentos disponíveis para o levantamento da CEa de modo dinâmico tornam restrita a compreensão mais detalhada acerca dos parâmetros que influenciam no resultado observado, em que pesam também fontes de variação temporais.

Este trabalho tem como objetivo contribuir ao entendimento da variabilidade da CEa observada em solos agrícolas representativos do ambiente tropical.

Desenvolveram-se métodos para verificar a presença e a influência da estratificação de propriedades do solo sobre as medidas de CEa tomadas na superfície.

A hipótese a ser testada é de que a sondagem elétrica vertical pode contribuir para o entendimento da variabilidade horizontal e em profundidade de propriedades de interesse agrônomo em solos de ambiente tropical.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentação teórica da condutividade elétrica

A resistividade elétrica pode ser definida como a propriedade que um material tem de se opor ao fluxo de corrente elétrica. Segundo Allred et al. (2008), considerando, por exemplo, um cilindro composto por material uniforme, com comprimento L , em metros, e seção de área A , em m^2 , (Figura 1). Uma corrente elétrica I , em Amperes, definida como o fluxo de carga elétrica, é aplicada em uma extremidade do cilindro e o deixa pela outra. O material do cilindro se opõe em maior ou menor grau a este fluxo, causando dessa forma uma queda no potencial elétrico, ΔV , em Volts, que ocorre ao longo do comprimento do cilindro desde a entrada de I em uma extremidade até sua saída em outra.

Figura 1 – Fluxo da corrente elétrica I através de um cilindro composto por material uniforme com resistividade ρ , que produz uma diferença de potencial elétrico ΔV entre uma extremidade e outra (Adaptado de ALLRED et al., 2008)

O potencial elétrico pode ser descrito como a energia potencial para uma unidade de carga, resultante de sua posição dentro de um campo elétrico. Conforme indicado na eq. 1, ΔV é proporcional a I , e a constante de proporcionalidade é a resistência R , em Ohm, que é uma característica da habilidade do cilindro em se opor ao fluxo de elétrons.

$$\Delta V = -R \times I \quad (1)$$

O sinal negativo na equação indica que a corrente I ocorre em uma direção oposta àquela de aumento de potencial elétrico. A eq. 1 é conhecida como a lei de Ohm, e a resistência R do material pode ser expressa como apresentado na eq. 2, onde L representa o comprimento, A é a área da seção e ρ , a resistividade elétrica, em Ohm m.

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2)$$

Os valores de resistividade para solos e materiais rochosos são geralmente apresentados em unidades de ohm metro ($\Omega \text{ m}$) e os de condutividade expressos em milisiemens por metro (mS m^{-1}). A condutividade elétrica σ , é obtida pelo inverso da resistividade ou seja, $\sigma = 1/\rho$. A condutividade elétrica, propriedade indicativa da habilidade de um material em transmitir corrente elétrica, é mais comumente utilizada na agricultura que seu inverso e neste trabalho será esta a propriedade considerada.

2.2 Condutividade elétrica aparente do solo

A condutividade elétrica é uma propriedade específica de cada substância. O solo é um meio composto por diversos materiais, cada um possuindo condutividade própria. A condução de corrente elétrica através do solo se deve à presença de sais livres na solução do solo e íons trocáveis na superfície das partículas (FRIEDMAN, 2005; CORWIN; LESCH; FARAHANI, 2008).

Rhoades et al. (1989), explicam que são três os caminhos da corrente elétrica no solo, há a condutância através de camadas alternadas de partículas e solução do solo, aquela através de canais contínuos de solução do solo e aquela nas partículas sólidas, seja através ou em superfície. Estes três componentes contribuem para a condutividade global do solo, que é denominada condutividade elétrica aparente do solo (CEa), integrando as participações dos componentes.

Friedman (2005) afirma que para o entendimento da CEa é necessário definir os vários componentes do solo e seu efeito. Os fatores podem ser agrupados em três categorias, na primeira estão aqueles que descrevem o meio, em função das participações volumétricas das porções sólida, líquida e gasosa e da maneira como estão arrançadas, ou seja, sua porosidade, conteúdo de água e estrutura. A segunda categoria é composta por fatores que caracterizam a fração sólida, ou seja, forma, orientação e distribuição do tamanho das partículas, capacidade de troca de cátions e afinidade pela água. Na terceira categoria estão os fatores relacionados às características da solução do solo, como a força iônica, composição catiônica e temperatura.

A fase líquida e a sólida, são determinantes para fenômenos elétricos espontâneos no solo e para o comportamento de campos elétricos criados artificialmente. O ar do solo pode

ser considerado um isolante. Solos com maior teor de argila facilitam a passagem da corrente elétrica, ao passo que aqueles onde predomina a textura arenosa irão proporcionar maior resistividade. As partículas de areia são geralmente constituídas por quartzo, considerado um isolante elétrico. A fase líquida, ou solução do solo, pode ser considerada uma solução eletrolítica, ou seja, possui diversos íons que se dissociam servindo como carreadores de carga para a passagem da corrente elétrica (FUKUE et al., 1999; ALLRED et al., 2008).

Friedman (2005) denomina σ_w como condutividade elétrica da solução do solo e σ_a ou ECa como condutividade elétrica aparente do solo. Demonstra que existe uma relação entre o conteúdo de água (Θ), σ_w e σ_a , porém o estabelecimento de um modelo teórico para expressar esta relação é praticamente impossível dado que há outros fatores relacionados ao solo e ao ambiente que limitam a precisão e geralmente são necessárias trabalhosas calibrações locais-específicas para poder construir tal relação funcional.

A relação empírica proposta por Archie (1942), eq. 3, é utilizada com frequência para obter os valores de porosidade ou resistividade da solução em solos e meios porosos saturados ou não (ALLRED et al., 2008; BANTON et al., 1997; FRIEDMAN, 2005; SAMOUËLIAN et al., 2005). A resistividade aparente do solo, expressa como ρ , pode ser modelada em função da porosidade, ϕ , saturação relativa do volume de poros com água, S , e resistividade elétrica da solução do solo, ρ_w . A constante Z_1 apresenta valores oscilando entre 0,5 e 2,5, sendo frequentemente próximo a 1, Z_2 apresenta valores entre 1,3 e 2,5 sendo geralmente próximo a 1,3 para meios com sedimentos fracamente aderidos e Z_3 apresenta valores próximos a 2 quando S é maior que 0,3. O modelo foi desenvolvido para meios livres de argila, ou partículas que conduzem a corrente elétrica.

$$\rho = Z_1 \frac{\rho_w}{\phi^{Z_2} S^{Z_3}} \quad (3)$$

A umidade do solo e a condutividade elétrica da solução, que possuem expressivo impacto sobre a CEa são transientes e inter-relacionadas. Ao perder água por evaporação a concentração de sais se eleva e aumenta a condutividade da solução. Simultaneamente, o volume dos poros ocupados pela solução se reduz e com isso a condução elétrica é também reduzida. Dado que há menor continuidade do condutor eletrolítico e simultâneo aumento do comprimento de percurso da corrente que passa a ocorrer em menor escala pelos poros e em maior escala pelos filmes de água adsorvidos às partículas, a condutividade se reduz de modo expressivo, e de modo severo na medida em que os filmes de água passam a se desconectar,

em baixos níveis de umidade (ALLRED et al., 2008; CORWIN; LESCH, 2005). Conforme descrito por Freeland (1989), os solos podem ser considerados resistores elétricos que variam com o tempo, tornando-se crescentemente instáveis na medida em que as alterações nos estados da água e a energia com que ela está presa nas partículas variam. A umidade do solo é composta por água nos estados de vapor, sólido e líquido, havendo contínua passagem de um estado para outro em reação às oscilações de temperatura e outras variáveis.

Além da quantidade de íons presentes ρ_w também é influenciada pela mobilidade dos íons dissolvidos, que por sua vez é determinada pelo tipo de íon e pela temperatura da solução. A mobilidade de íons em soluções é inversamente dependente da viscosidade da solução, que é inversamente dependente da temperatura da solução. Quando a temperatura do solo se reduz, a viscosidade da solução aumenta e sua condutividade se reduz, (ALLRED et al., 2008; CORWIN; LESCH, 2005). Para poder comparar valores de resistividade é necessário corrigir aqueles obtidos em condições não controladas. McNeill (1980) apresenta a eq. 4, que relaciona os valores de resistividade na temperatura em que foi mensurada, ρ_{w-T} em $^{\circ}\text{C}$, com aquela na temperatura de 25°C tomada como referência, $\rho_{w-25^{\circ}\text{C}}$, sendo Z_4 um coeficiente de temperatura com o valor de $0,022\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, e T a temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, na qual a medida foi tomada.

$$\rho_{w-T} = \frac{\rho_{w-25^{\circ}\text{C}}}{1 + Z_4(T - 25^{\circ})} \quad (4)$$

A maior parte dos solos apresenta partículas de argila e matéria orgânica na forma de húmus. Estas partículas recobrem aquelas de silte e areia, permanecendo na superfície de contato com a solução do solo presente nos poros. Esta característica lhes confere participação efetiva em diversos processos do solo, com efeito maior do que se poderia supor com base em sua participação em massa. Em condições onde há umidade, estas partículas contribuem para a passagem da corrente elétrica, pois apresentam cargas negativas em sua superfície. Quando filmes de água recobrem estes materiais os cátions conectados às partículas se desprendem pelo efeito de outros presentes na solução, e se movem livremente podendo também gerar o desprendimento de outros cátions em outros sítios. Este processo produz um mecanismo que permite a condução da corrente elétrica de modo eletrolítico através da superfície das partículas úmidas de argila e matéria orgânica. A quantidade de cargas depende do tipo de argila e material orgânico, sendo expresso por meio da capacidade de troca catiônica (CTC) (ALLRED et al., 2008).

A condução elétrica através do solo deve-se à presença de sais livres na solução do solo e íons trocáveis nas superfícies das partículas sólidas. O tratamento do solo como um modelo de resistores permite a formulação de modelos mecânicos da CEa aplicáveis a uma ampla faixa de condições (CORWIN; LESCH; FARAHANI, 2008)

Rhoades, Raats e Prather (1976) propuseram um modelo para descrever os efeitos dos componentes da condutividade elétrica, considerando haver condutância também pelas partículas do solo. Em seu modelo, eq. 5, a condutividade aparente (EC_a) é função da condutividade global da solução do solo (EC_w), da umidade do solo (θ), da condutividade da superfície das partículas do solo (EC_s) e de um fator de transmissão obtido empiricamente, eq. 6, relacionado à estrutura do solo (T).

$$EC_a = EC_w \theta T + EC_s \quad (5)$$

$$T = a\theta + b \quad (6)$$

A condutividade elétrica aparente do solo é geralmente modelada como resultante da interação de resistores em paralelo, possuindo um componente relacionado à condução através da solução presente nos poros, outro à condução através das interfaces entre filmes de solução do solo e partículas e um terceiro referente à condução pelas partículas em contato. Simplificações são realizadas para tornar os modelos mais simples e geralmente se despreza a condução através das partículas (FRIEDMAN, 2005; ALLRED et al., 2008;).

Rhoades et al. (1989) desenvolveram o modelo da eq. 7, contemplando os três caminhos do fluxo da corrente elétrica atuando em paralelo no solo.

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 EC_w EC_{ss}}{(\theta_{ss} EC_{ws}) + (\theta_{ws} EC_{ss})} \right] + (\theta_w - \theta_{ws}) EC_w \quad (7)$$

Onde,

EC_a – condutividade elétrica aparente do solo, dS m⁻¹,

EC_w – condutividade elétrica da solução do solo, dS m⁻¹,

EC_{ws} – condutividade elétrica do componente formado por partículas de solo e filmes de água conectados em série, dS m⁻¹,

EC_{ss} – condutividade elétrica da superfície das partículas, dS m⁻¹,

θ_{ss} – conteúdo volumétrico da condutância na superfície de partículas, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$

θ_{ws} – conteúdo volumétrico de água do componente formado por partículas de solo e filmes de água conectados em série, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$,

θ_w – conteúdo volumétrico de água do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$,

Assumindo equilíbrio entre a condutividade das frações de soluções no solo (i.e., $EC_w = EC_{ws}$), de acordo com a eq. 7, a CEa é determinada por cinco parâmetros. Rhoades et al. (1989) demonstraram através de aproximações empíricas que estes parâmetros se relacionam com quatro propriedades mensuráveis do solo, sendo elas a condutividade do extrato de saturação, EC_e , em dS m^{-1} , a quantidade de água necessária para saturação, SP , em g, a densidade do solo, ρ_b , em Mg m^{-3} , e o conteúdo gravimétrico de água do solo, θ_g , kg kg^{-1} , conforme apresentado nas eq. 8 a 12.

$$\theta_w = \theta_g \rho_b \quad (8)$$

$$\theta_{ws} = 0,639\theta_w + 0,011 \quad (9)$$

$$\theta_{ss} = \frac{\rho_b}{2,65} \quad (10)$$

$$EC_{ss} = 0,019(SP) - 0,434 \quad (11)$$

$$EC_w = \left[\frac{EC_e \rho_b SP}{100 \theta_w} \right] = EC_e \left(\frac{SP}{\theta_g} \right) \quad (12)$$

2.3 Métodos de mensuração da CEa

Diferentes métodos podem ser empregados para obter medidas da CEa, sendo que os métodos resistivo e o indutivo apresentam maior expressão em função da simplicidade e praticidade, respectivamente.

Corwin e Lesch (2003) descrevem o método de mensuração da CEa através de indução eletromagnética. O instrumento utilizado, apresentado na Figura 2, é composto por uma bobina localizada em uma de suas extremidades, que induz uma corrente circular em espiral no solo. A intensidade da rotação ao interagir com o solo é proporcional à condutividade

elétrica. Cada rotação induzida pela corrente gera um campo eletromagnético secundário. Uma fração desse campo secundário retorna a uma segunda bobina do instrumento que soma e amplifica esses sinais retornando uma voltagem que se relaciona à CEa ponderada em função da profundidade.

Figura 2 – Equipamento EM38 que mensura a resistividade elétrica utilizando o método da indução eletromagnética e seu princípio de funcionamento (Fonte: CORWIN; LESCH, 2003)

O método resistivo, também denominado galvanométrico, ou de contato, foi o primeiro utilizado para obter informações sobre a resistividade do solo, sendo amplamente empregado em estudos geofísicos. Correntes elétricas são introduzidas no solo e a diferença de potencial é quantificada. Através da lei de Ohm e considerando a geometria dos eletrodos utilizados se obtém valores de resistividade do solo representativos de um volume proporcional à distância de separação entre os eletrodos (ALLRED et al., 2008).

Para evitar a formação de potenciais elétricos indesejados, devido à polarização dos eletrodos em contato com a solução do solo, utiliza-se normalmente correntes alternadas de baixa frequência, geralmente próximas a 10 Hz. A frequência também é mantida baixa para manter a densidade de corrente alta, permitindo a prospecção a maiores profundidades, (ALLRED et al., 2008). Segundo Friedman (2005), quando se utilizam altas frequências, entre quilo e mega-hertz, a condutividade aparente não é mais constante, mas aumenta com o aumento da frequência.

Segundo Samouëlian et al. (2005), foi Schlumberger o responsável por empregar pela primeira vez, em 1912, o uso da resistividade elétrica para prospectar a subsuperfície de

maciços de rochas. O método foi empregado originalmente por companhias de exploração de petróleo em busca de reservas e identificação de formações geológicas.

Existem diversos modos de arranjar os eletrodos na superfície para realizar a prospecção, alguns deles são apresentados na Figura 3. Em função da posição dos eletrodos, sua distância de separação e profundidade de inserção no solo, é necessário definir um coeficiente geométrico representativo do volume do meio analisado para o cálculo da resistividade elétrica. O trabalho de Wenner (1915) teve grande influência na difusão e uso da técnica. Apresentando um arranjo com quatro eletrodos igualmente espaçados e o modelo matemático para cálculo do coeficiente geométrico e da resistividade, permitiu a difusão da técnica a ponto do arranjo proposto passar a ser denominado com seu nome.

Figura 3 – Três arranjos de eletrodos utilizados em levantamentos pelo método resistivo (Adaptado de SAMOUËLIAN et al., 2005)

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2012), o método dos quatro eletrodos é o mais empregado para a medição da resistividade de grandes volumes de

terra, havendo algumas variações de arranjo dos eletrodos. Para o arranjo dos quatro eletrodos igualmente espaçados, ou simplesmente arranjo de Wenner, a resistividade ρ é calculada pela eq. 13, onde a é a distância entre os eletrodos adjacentes, b é a profundidade de cravação dos eletrodos, V é a diferença de potencial e I a corrente elétrica.

$$\rho = \frac{4\pi a \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad \text{eq. 13}$$

A sondagem elétrica vertical é um método para caracterizar a estratificação do terreno, sendo realizada através de medidas a partir da superfície com gradual aumento da distância de separação entre eletrodos. Na sondagem elétrica as curvas de resistividade elétrica obtidas com afastamentos sucessivos dos eletrodos são, entretanto, interpolações, e podem ser suavizadas ao ponto de não aparecerem quando plotadas, havendo métodos alternativos que reduzem os erros neste cálculo (CALIXTO et al., 2010).

Allred, Ehsani e Saraswat (2006) compararam três princípios de mensuração da resistividade elétrica para obter informações sobre a condutividade aparente, sendo eles a indução eletromagnética, capacitância e galvanometria. Para cada um dos métodos foram utilizados distintos ajustes, totalizando nove configurações. Os sistemas foram avaliados em duas parcelas em campo, possuindo solos de textura franco-argilosa e sendo realizadas medidas em duas condições hidrológicas distintas. Os resultados demonstraram que, exceto para o método da galvanometria com a configuração de eletrodos muito próximos, todos foram capazes de identificar regiões com comportamento distinto quanto à condutividade elétrica, apesar de os valores médios obtidos para as parcelas serem distintos entre os equipamentos.

Sudduth et al. (2003) compararam os princípios da indução eletromagnética e da resistividade elétrica para a determinação da condutividade elétrica e de sua distribuição espacial. Concluíram que embora permitam obter padrões espaciais de condutividade elétrica semelhantes, existe diferença entre os métodos em função do volume de solo explorado ser distinto. Verificaram ainda que nos casos em que o solo possui horizontes com gradientes mais expressivos a diferença entre os métodos tende a ser maior.

Sudduth et al. (2005) avaliaram o desempenho de dois sistemas para mensuração da condutividade elétrica do solo sendo um por indução e o outro resistivo. Diferenças foram notadas nos resultados dos equipamentos e estas foram atribuídas às características de

resposta que os equipamentos apresentam para a mesma profundidade de mensuração. Apesar das profundidades de contribuição total para as leituras de condutividade serem semelhantes para os equipamentos, o modo como o campo elétrico varia difere entre eles e, portanto, sua resposta também. Resultado semelhante foi obtido por Gebbers e Lück (2008), que compararam as dissimilaridades entre a condutividade para mesmos solos utilizando métodos indutivos e de contato. Em seu trabalho eles concluíram que os métodos indutivos são mais sensíveis para camadas com maior condutividade e que os métodos resistivos são para aquelas com baixa condutividade.

Gebbers et al. (2009) compararam sete instrumentos distintos utilizados para o mapeamento detalhado da CEA do solo. Contrariamente à maioria dos trabalhos apresentados na literatura, utilizaram solos arenosos, mais resistivos. Identificaram diferenças significativas entre os equipamentos quanto à sua profundidade de investigação, variações temporais nas leituras e facilidade de manuseio. Concluíram que os sistemas que utilizam o princípio da resistividade são os mais indicados para aplicações em agricultura de precisão e observaram que as curvas de resposta de levantamentos geoeletricos podem variar em função da estratificação do solo em camadas de maior ou menor condutividade.

Segundo ABNT (2012), metade da corrente injetada no solo, circula acima de uma profundidade igual à metade da distância entre eletrodos, e grande parte da corrente flui acima da profundidade igual à separação entre eles. Para estas conclusões pressupõe-se a condição de solos homogêneos, não sendo as mesmas válidas para solos estratificados, nos quais a densidade de corrente varia de acordo com a distribuição de resistividades.

Na literatura encontram-se informações contraditórias com relação à profundidade de prospecção do arranjo de quatro pontas de Wenner no estudo de solos. Para Tabbagh et al. (2000), a profundidade de prospecção do arranjo de Wenner pode oscilar entre a e $a/2$.

Braga (2002) afirma que a profundidade do solo representada pela leitura obtida com uma determinada separação dos eletrodos oscila em função da presença de camadas mais ou menos homogêneas no meio mensurado e por este mesmo motivo denomina-se a grandeza mensurada de resistividade ou condutividade aparente.

Roy e Apparao (1971) examinaram a contribuição de cada volume elementar de terra para o sinal total, $\Delta V/I$, observado na superfície. Introduziram o conceito de profundidade de prospecção característica (depth of investigation characteristic – DOI), para arranjos de eletrodos em meios homogêneos. Integrando esta contribuição para uma fina camada horizontal e normalizando de modo a igualar o sinal total à unidade, construíram as curvas representativas para diversos arranjos, que denominaram NDIC (normalized depth of

investigation characteristic). Segundo eles a profundidade de prospecção seria aquela onde o valor de NDIC é máximo, ou seja, aquela onde a contribuição ao sinal seria máxima, a que denominaram Z_{max} .

Edwards (1977) demonstrou que embora o NDIC apresente boa relação com valores observados em diversos levantamentos, e tem a virtude de definir com precisão um valor indicativo da profundidade de prospecção, não sendo o método mais adequado para caracterizar a profundidade efetiva de prospecção, uma vez que as curvas de DIC ou NDIC são assimétricas e deslocadas para as maiores profundidades. Sugeriu que a profundidade mediana, que denominou Z_{med} , definida como aquela a partir da qual metade do sinal total está acima e metade abaixo, seria mais adequada para representar a profundidade efetiva z_e .

Embora haja autores que afirmem que a profundidade seja praticamente a mesma daquela representada pela separação dos eletrodos, i.e. sendo a o espaçamento entre eletrodos, ou por uma razão desta separação como $a/2$ ou $a/3$ (NASCIMENTO; PIRES; MORAES, 2004), é demonstrado que a profundidade de investigação oscila em função da presença de heterogeneidade do meio (NADLER, 1980), havendo entretanto divergências entre autores na definição da profundidade de investigação. Herman (2001) apresenta como solução para o arranjo de Wenner, a razão $z = AB/2$, sendo AB a distância entre os eletrodos de corrente e z a profundidade efetiva de penetração da corrente, ponto no qual haveria 50% da corrente acima ou abaixo. Em sua revisão sobre o assunto, Szalai, Novák e Szarka (2009), propõem a relação $z_e/R=0,175$, em que z_e é a profundidade mediana de prospecção e R o valor de afastamento dos eletrodos de corrente. Ainda, segundo os autores, a profundidade de maior sensibilidade (z^*), do arranjo Wenner pode ser calculada a partir da relação $z^*/R = 0,105$.

Alguns autores de trabalhos voltados à área agrônômica tomam como referência valores de profundidade apresentados pelos fabricantes de equipamentos. Isto é particularmente notável no caso do sistema com nome comercial Veris®, que possui seis eletrodos dispostos de modo a criar dois arranjos de quatro pontos. A distância de separação a do menor arranjo é de 0,24 m e do maior de 0,72 m. Segundo os trabalhos de Edwards et al. (1977) e Roy e Apparao (1971), para o espaçamento de 0,24 m a profundidade de maior sensibilidade é de 0,08 m e aquela denominada efetiva é de 0,13 m. No caso do espaçamento maior a profundidade de maior sensibilidade é de 0,23 m e aquela denominada efetiva é de 0,37 m.

Segundo a expressão apresentada por Sudduth et al. (2005), para o cálculo da resposta acumulada ao sinal injetado no solo pelo arranjo de Wenner, eletrodos espaçados a 0,24 m possuem 90% da resposta ao sinal na camada de solo até 0,32 m e para eletrodos espaçados em 0,72 m até 0,97 m. Estes últimos valores estão de acordo com aqueles apresentados em

diversos trabalhos desenvolvidos no Brasil, em que ao menor arranjo corresponderia, segundo os autores, a camada de solo até 0,3 m e até 0,9 para o maior (BRANDÃO et al., 2012; MOLIN; RABELLO, 2011; MACHADO et al., 2006; REIS, 2005; BECEGATO, 2005; MOLIN; FAULIN, 2013; MOLIN; CASTRO, 2008). Não há nos trabalhos, entretanto, menção ao fato da resposta ao sinal não ser linear em função da profundidade, sendo que em muitos deles se correlacionam valores de propriedades do solo obtidas através de amostragens realizadas em profundidades que não condizem com aquela em que o arranjo apresenta maior sensibilidade. Em outros ainda, como é o caso de Alcântara (2010) e Valente et al. (2012), a profundidade de prospecção é considerada igual ao espaçamento entre eletrodos.

2.4 Relação entre propriedades do solo e CEa

A mensuração da CEa é relativamente simples e de baixo custo, portanto a ocorrência de relacionamento desta com outras propriedades de interesse agrônomo de difícil mensuração é desejável, sobretudo pela possibilidade de caracterizar a variabilidade espacial.

A maior parte das propriedades que influenciam a CEa apresenta-se correlacionada, com efeitos coincidentes ou redundantes que levam a interpretações confusas. De modo geral o grau de associação da CEa com uma determinada propriedade do solo é também dependente do momento, pois muitas propriedades do solo são dinâmicas (FUKUE et al., 1999; BESSON et al., 2004; CORWIN; LESCH; FARAHANI, 2008).

As interações complexas entre os componentes da condução de corrente elétrica pelo solo levam à ocorrência de baixas correlações entre a CEa do solo e um fator específico ou mesmo efeitos inversos aos esperados. Este tipo de resultado demonstra simplesmente que há outros fatores, atuando individualmente ou de forma conjugada, que apresentam maior impacto sobre a CEa que aquele em estudo (ALLRED et al., 2008).

O uso da resistividade elétrica para mensurar a umidade do solo foi pela primeira vez considerada após sua utilização para a instalação de barras de aterramento em sistemas telefônicos e de telégrafos na segunda metade do século XIX. Várias foram as tentativas em se utilizar a resistividade para obter a umidade do solo no período entre 1897 e 1940, porém embora promissora a técnica enfrentava limitações em função das variações na resistência de contato dos eletrodos com o solo e pelo emprego da corrente contínua nos instrumentos, (FREELAND, 1989).

Rhoades, Raats e Prather (1976) utilizaram o arranjo de Wenner em amostras de solo indeformadas para avaliar o efeito da umidade e salinidade da solução do solo nos valores de condutividade elétrica de quatro solos com mineralogia distinta. Desenvolveram um modelo matemático que permitiu estimar a salinidade através da condutividade elétrica aparente tomada em condições de umidade não padronizadas. Obtiveram curvas distintas para cada tipo de solo, umidade e condutividade elétrica da solução e chegaram a estimativas da condutividade elétrica da superfície das partículas dos solos demonstrando que esse valor varia em função do tipo de solo, oscilando entre 18 e 45 mS m⁻¹ para solos com valores da participação da fração argila entre 6,2 e 29,3%, valores da CTC entre 9,2 e 24,8 meq 100g⁻¹ e superfície específica entre 37,4 e 78,3 m² g⁻¹.

Fukue et al. (1999) descrevem as propriedades elétricas das partículas de argila como mais complexas que as de areia. Em geral a resistividade elétrica das partículas de argila é menor que aquela apresentada pela solução do solo, sendo isto devido à presença de dupla camada difusa entre a interface sólido-líquido que apresenta baixa resistividade.

Robinson (2003) apresentam modelos de relacionamento para meios porosos como o solo. Em geral, solos secos possuem resistência extremamente alta. Os minerais do solo aparecem como isolantes, embora em alguns casos possa haver uma pequena passagem de corrente pela superfície das partículas. Conforme o solo se torna mais seco, sua condutividade elétrica diminui, sendo a redução mais pronunciada conforme se aumentam os níveis de salinidade. As medidas de resistência em condições de baixa umidade são menos estáveis que aquelas obtidas com maior umidade e se tornam ainda mais instáveis quando além de baixa umidade ocorre variação na temperatura.

A partir de 1941, utilizando o arranjo de eletrodos proposto em 1915 por Wenner, e fontes de corrente alternada, começaram a ser obtidas medidas mais estáveis e o método foi gradualmente aperfeiçoado até ser possível seu uso em condição de campo, em 1971.

2.5 Aplicações da CEa do solo na agricultura

Diversos são os empregos da CEa do solo na agricultura, havendo produção científica abundante sobre o assunto.

Para Tabbagh et al. (2000), a condutividade elétrica, por apresentar uma ampla faixa de valores e por ser facilmente mensurada sem danificar a amostra, permanece como o parâmetro geofísico mais adequado para levantamentos corriqueiros. O mapeamento da resistividade

elétrica utilizando arranjos de eletrodos com tamanhos distintos permite obter boa descrição da estrutura tridimensional do solo.

Entre diferentes métodos geofísicos utilizados por Becegato (2005) para discriminar os solos em dois talhões na região noroeste do Paraná, o autor concluiu que o método da resistividade elétrica é uma importante ferramenta para auxiliar no mapeamento de solos, principalmente em áreas onde ocorrem variações na textura, teores de argila e areia. Embora tenha sido utilizado um metro de espaçamento entre os eletrodos, aberturas maiores, segundo o autor, podem ser utilizadas para se obter dados de mais profundidade nos perfis dos solos e aberturas menores para discriminar os horizontes dos solos.

Molin e Faulin (2013) utilizaram o equipamento comercial Veris 3000, que emprega o princípio resistivo, para mensurar a condutividade elétrica do solo, em duas áreas sob cultivo de grãos em semeadura direta, que apresentavam características distintas em termos de solos. Foram realizadas medições em dois momentos para cada área. Em uma primeira área, caracterizada pela presença de variabilidade na textura, os autores identificaram estreita relação entre a participação da argila na granulometria e condutividade elétrica do solo. O mesmo não ocorreu na área onde a variabilidade granulométrica era menor. Os autores reforçam a relação positiva existente entre os teores de argila e água no solo e a ambiguidade na definição de qual fator tem influência predominante sobre a condutividade elétrica do solo.

Lukas, Neudert e Kren (2009) encontraram forte correlação entre as leituras de condutividade e os teores de argila e areia utilizando um equipamento cujo princípio é a indução eletromagnética. Estabilidade foi encontrada entre leituras feitas em diferentes anos. Os autores identificaram que a condutividade elétrica é uma ferramenta interessante para delimitação de regiões com solos distintos e dessa forma permite realizar a amostragem dirigida do solo. Tabbagh et al. (2000) observaram maior variabilidade nos valores de resistividade elétrica nas menores separações entre eletrodos, de 1 e 2 m, quando comparados àqueles de 4 e 8 m.

Pincelli (2004) construiu dois sistemas para a mensuração da condutividade elétrica do solo. Embora capazes de mensurar a condutividade elétrica, os sistemas não forneceram leituras comparáveis com um sistema de referência utilizado nos dois talhões onde foram empregados.

Oliveira (2006), utilizando dois métodos de mensuração da condutividade elétrica, um resistivo e um por indução, identificou maiores valores de condutividade associados com maiores teores de água e de argila em uma gleba sob semeadura direta de soja e algodão no

Mato Grosso. A produtividade mensurada com um monitor de colheita se relacionou com a condutividade elétrica mensurada através do método indutivo, até a profundidade de 1,5 m.

Celinski (2008) desenvolveu um instrumento de baixo custo para mensurar a resistência e capacitância elétrica do solo. O sistema foi utilizado para realizar mensurações em um talhão produtivo na região de Ponta Grossa – PR, visando verificar a relação entre as leituras e propriedades físicas e químicas de solos. As medidas de resistência e capacitância elétrica obtidas correlacionaram-se com os teores de argila e areia, mas não com a umidade.

Lezzi (2008) avaliou a aplicação de uma sonda de resistividade elétrica para a estimativa da salinização de solos. A sonda foi capaz de detectar salinidade em ensaios realizados em ambiente controlado, mas apresentou restrições quanto ao uso em campo, sendo instável quando ocorreram variações nas condições físicas e hídricas dos solos.

Harvey e Morgan (2009) desenvolveram um modelo e um método de calibração de um sensor indutivo para estimar os teores de argila em solos em distintos talhões. Os autores conseguiram acurácias entre 2 e 4 % em diferentes talhões.

Utilizando o método resistivo com 48 eletrodos espaçados em 0,25 m, Amato et al. (2008), criaram um tomograma da resistividade elétrica do solo com o objetivo de caracterizar o sistema radicular de árvores conforme apresentado na Figura 4. A resistividade elétrica do solo se relacionou quantitativamente com a biomassa subterrânea das raízes das árvores e, dessa forma, o método pode ser desenvolvido para detecção da distribuição e quantificação do sistema radicular de árvores bem como para a otimização das estratégias de amostragem para estudo do sistema radicular.

Figura 4 – Tomograma da resistividade elétrica em A e distribuição da biomassa seca do sistema radicular de árvores em B (Fonte: AMATO et al., 2008)

Doolittle et al. (2009) utilizaram o equipamento indutivo EM 38, para medir a condutividade elétrica e verificar a possibilidade de uso dessas informações como auxiliar ao trabalho de classificação de solos. Como resultados obtiveram mapas de condutividade elétrica que auxiliaram o direcionamento de amostragens para classificação detalhada. Apesar do mapa final de classificação ser dependente da experiência do pedólogo, concluíram que o uso de mapas detalhados de condutividade elétrica permite acelerar o processo. De modo similar, Pozdnyakova (1999) utilizou a resistividade elétrica do solo para caracterizar a variabilidade de perfis. Também há exemplos de uso como ferramenta à avaliação dos efeitos de longo prazo em sistemas de manejo do solo e estratégias de fornecimento de fertilizantes (WERBAN; KUKA; MERBACH, 2009).

Eigenberg et al. (2006) avaliaram a CEa em uma área sob manejo intensivo visando a produção de silagem. Várias formas de esterco líquido e compostos orgânicos foram aplicados visando o fornecimento de fertilizante nitrogenado. Os autores demonstraram que a condutividade elétrica foi efetiva na identificação da dinâmica de disponibilidade de N para as plantas durante quatro safras.

Fleming et al. (2004) utilizaram a condutividade elétrica para identificar unidades de manejo para a aplicação de fertilizantes em taxa variável. O método provou-se eficiente na separação de unidades com características distintas.

Kitchen et al. (2003) avaliaram a interação entre condutividade elétrica do solo, topografia e produtividade em três talhões durante várias safras contemplando as culturas de milho, soja, sorgo e trigo. O trabalho trouxe muitas contribuições para o entendimento do uso da condutividade elétrica como ferramenta para manejo da variabilidade espacial. Houve uma grande influência do clima durante a safra nos resultados obtidos, mas de modo geral o uso das informações de condutividade elétrica combinadas com informações sobre as feições do terreno permitem bom entendimento da variabilidade espacial da produtividade.

Robain et al. (1996) utilizaram o arranjo Wenner com espaçamento de 0,1 m para obter medidas de resistividade ao longo das paredes de poços abertos para a descrição de perfis de solo, o que permitiu caracterizar a variabilidade ao longo do perfil, que segundo eles estava relacionada à constituição dos solos.

Seladji et al. (2010) demonstraram que a resistividade elétrica é sensível à alteração da densidade do solo independentemente da sua composição granulométrica, podendo ser este efeito caracterizado quando a umidade gravimétrica é inferior a 0,25 kg kg⁻¹. A resistividade elétrica do solo também é reduzida com o aumento da saturação relativa por água.

Besson et al. (2004) utilizaram a resistividade para identificar camadas de solo com densidades distintas e consideraram o método como alternativa para o estudo quantitativo de camadas de solo mobilizadas. A redução da resistividade ao longo do perfil do solo coincidiu com a elevação da densidade, na parte inferior da camada mobilizada, porém como a participação da argila no solo também aumentou, os efeitos se confundiram.

Um número razoável de resultados de pesquisa desenvolvidas no Brasil está disponível na literatura. Na Tabela 1, são apresentados alguns valores de CEa obtidos nestes trabalhos.

Tabela 1 – Valores de condutividade elétrica obtidos em diversos estudos realizados no Brasil, quando disponíveis as informações de profundidade são apresentadas

Autor	Local	Solo	CE _a (mS.m ⁻¹)	Prof. (m)
Brandão et al. (2012)	Cristalina, GO	Latossolo Vermelho Amarelo	7 a 15,9 e 4,8 a 10,8	0,3 e 0,9
Valente (2012)	Araponga, MG	Latossolo Vermelho Amarelo	0,4 a 1,8	0,2 e 0,4
Costa (2011)	Goianópolis, GO	Latossolo Vermelho-amarelo	2,6 a 5,9	0,2
Molin (2011)	Piracicaba, SP	Argissolo Vermelho Amarelo	1,5 a 12,5	0,3 e 0,9
Alcântara (2010)	Gemeleira de Goiás, GO	Latossolo Vermelho Escuro	3,0 a 9,4	0,2 e 0,4
Nascimento (2008)	Brasília, DF	Latossolo	0,06 a 6,8	
Oliveira (2006)	Pedra Preta, MT	-	6,5, 4,8 e 7,8	0,3, 0,9 e 1,5
Machado et al. (2006)	Carambeí, PR	Latossolo Vermelho	1,9 a 13,7	0,3 e 0,9
Reis (2005)	Sete Lagoas, MG	Latossolo Amarelo-Escuro	6,27	0,3 e 0,9
Becegato (2005)	Iguaraçu, PR	Nitossolo e Latossolos	2,7 a 7,8	0,5
Molin (2005)	Carambeí, PR	Latossolo Vermelho, Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico	12,3 a 17,7	0,75 e 1,5
Molin e Faulin (2013)	Tibagi-PR, Campos Novos Paulista, SP	-	0,6 a 3,9 e 0,6 a 1,8	0,3 e 0,9
Nascimento, Pires e Moraes (2004)	Brasília, DF	Cambissolo, Litólico e Latossolos	0,2 a 0,03	0,5
Molin e Castro (2008)	Castro, Carambeí e Ponta Grossa, PR	Cambissolos e Latossolos	4,9 a 12,9 e 2,7 e 6,3	0,3 e 0,9
Abreu (2000)	Brasil	26 classes	13 a 97	Laboratório

2.6 Variabilidade espacial da CEa do solo

Embora a presença de variabilidade espacial na produtividade e nos fatores que a condicionam seja reconhecida por produtores e técnicos há muitos anos, apenas duas décadas nos separam do surgimento da tecnologia que permitiu manejar esta variabilidade (VITHARANA et al., 2008).

À filosofia e tecnologias desenvolvidas com a finalidade de entender e manejar a variabilidade espacial nos ambientes de produção, denomina-se Agricultura de Precisão, cujo preceito mais evidente é o de substituir as práticas correntes de tratamentos uniformes nos campos por aqueles realizados de modo variável, em função das condições locais de otimização da produtividade e de redução do impacto ambiental. Embora o produtor não esteja propriamente interessado na variabilidade espacial do solo, este aspecto é determinante para o aumento de sua eficiência que pode se refletir em melhor rentabilidade (LÜCK et al., 2009).

O uso de métodos indiretos que permitam obter uma amostragem espacialmente detalhada do solo em áreas em produção é fundamental para reduzir o número de amostragens coletadas a serem enviadas para análises laboratoriais e para melhorar o entendimento da variabilidade presente e reduzir o custo (RABELLO et al., 2008).

A condutividade elétrica do solo, obtida através de equipamentos que mensuram a resistividade de modo automatizado e com baixo custo, pode ser considerada uma ferramenta muito útil para delimitar as variabilidades temporal e espacial (SAMOUËLIAN et al., 2004). Embora não permita obter de modo eficiente indicações sobre os teores de nutrientes presentes (HEINIGER; MCBRIDE; CLAY, 2003), vem sendo adotada como método de regionalização de ambientes dentro dos campos de produção que possuem características distintas quanto à disponibilidade hídrica (BESSON et al., 2010), acidez e nutrientes (LUKAS; NEUDERT; KREN, 2009; HEINIGER; MCBRIDE; CLAY, 2003), carbono (WEBAN et al., 2009) e principalmente variações na textura (OGURI et al., 2009).

Por sua capacidade em identificar a variabilidade de importantes características físicas e químicas do solo a CEa pode ser empregada para subdividir áreas onde se desejam implantar experimentos, reduzindo os erros na implantação de experimentos no campo, permitindo ainda obter maior segurança na interpretação de experimentos em áreas maiores em que não é possível realizar repetições (JOHNSON; ESKRIDGE; CORWIN, 2005).

Vários são os instrumentos utilizados na mensuração da resistividade, apresentando maior capacidade em caracterizar a variabilidade do solo em função de suas características de constituição e condições hidrológicas (GEBBERS et al., 2009). A presença de estratificação no perfil do solo pode ser realizada com sucesso através de métodos resistivos, entretanto requer o uso de instrumentos capazes de mensurar esta característica em distintas profundidades (TABBAGH et al., 2000).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Três etapas caracterizam o trabalho desenvolvido. Na primeira, realizada em laboratório, foi desenvolvido um método para mensuração da CEa em amostras indeformadas. Na segunda etapa procedeu-se à determinação da CEa na superfície do solo, nas paredes de trincheiras e em amostras indeformadas para verificar as associações existentes. Na terceira etapa foi avaliada a distribuição espacial da CEa em duas condições de umidade do solo.

3.1 Locais de estudo e estratégia de coleta de amostras

As mensurações realizadas em campo ocorreram na região sul do estado do Mato Grosso. A escolha da região deve-se à representatividade dos solos presentes, que no Brasil central, responderam por aproximadamente 45% da área cultivada com soja no país em 2010 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2011).

Segundo Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral – SEPLAN (2007), a região é caracterizada por um conjunto de blocos planálticos e depressões de diferentes litologias datadas do paleozoico até unidades mais recentes, ocorrendo ainda derrames basálticos da formação Serra Geral. As características climáticas são comandadas pelo clima Tropical Úmido, apresentando amenização das temperaturas com aumento das altitudes. A temperatura média anual oscila entre 23,2 °C e 27,3 °C. A pluviosidade apresenta totais anuais de 1300 a 1800 mm, com trimestre chuvoso entre dezembro e fevereiro e período seco de 3 a 7 meses entre abril e outubro.

Utilizou-se um mapa de classificação de solos na escala 1:250.000 para identificar classes de solo distintas e sua distribuição (SEPLAN, 2001). Visitas a campo foram realizadas para checagem e definição dos pontos onde foram coletados os dados de resistência elétrica e abertas as trincheiras. Os perfis foram pedologicamente descritos e a classificação realizada segundo EMBRAPA (1999). A classificação dos solos é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos solos em que foram tomadas as medidas de resistência elétrica na segunda etapa do trabalho

Classificação	Símbolo	Altitude (m)	Latitude	Longitude
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, textura muito argilosa, A Moderado, fase cerrado tropical subcaducifolio, relevo plano.	LVd1	500	S17°09'19"	O54°42'55"
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, textura franco arenosa, A Moderado, fase cerradão tropical subcaducifolio, relevo suave ondulado.	LVd2	715	S15°12'36"	O54°32'34"
LATOSSOLO AMARELO Distrófico, textura argilosa, A Moderado, fase cerradão tropical subcaducifolio, relevo suave ondulado.	LAd	579	S15°26'48"	O54°21'24"
ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico, textura argilosa, A Chernozêmico, fase floresta tropical subcaducifolia, relevo ondulado.	PVe	223	S16°32'11"	O54°25'26"

Com os quatro solos obteve-se amplitude em características químicas e físicas entre os locais e dentro de cada local. Para permitir a comparação dos dados de resistência elétrica coletados na superfície com aqueles obtidos nas paredes das trincheiras, adotou-se a disposição apresentada na Figura 5. Em cada local foi removida a cobertura vegetal de uma área com 100 m². Estacas de madeira foram utilizadas para demarcar as extremidades e posições de colocação dos arranjos de eletrodos na superfície. Cordões foram amarrados nas estacas para auxiliar na demarcação dos locais de abertura das trincheiras. As medidas de resistência elétrica na superfície foram tomadas em seis repetições conforme indicado nas linhas pontilhadas. Duas trincheiras foram abertas após as mensurações na superfície, em cada tipo de solo e nestas foram tomadas as quatro paredes voltadas para o centro como unidades experimentais para a coleta de amostras indeformadas, medidas de resistência elétrica e classificação do solo.

Figura 5 – Esquema de abertura de trincheiras e posicionamento dos arranjos de eletrodos para coleta de dados de resistência elétrica na superfície

O LVd1 foi localizado na Fazenda Cachoeira, município de Itiquira, em relevo plano no extremo sul do estado do MT, sob cultivo de grãos em sistema conservacionista a cinco anos. A coleta dos dados de resistência elétrica e abertura da trincheira foram realizadas entre os dias 17 e 18 de abril de 2013 quando havia cultivo de milho. O LVd2 foi identificado em área sob cultivo de Algodão com preparo de solo a cada dois anos no município de Primavera do Leste, possuindo textura franco arenosa foi o solo com granulometria mais grosseira entre os avaliados e as coletas foram realizadas entre os dias 3 e 4 de maio de 2013. Também em Primavera do Leste, na Fazenda Cidade Verde, em área com histórico de cultivo de algodão em rotação com soja foi identificado o LAd com textura argilosa e sob cultivo de milho como cultura de cobertura no momento da coleta, entre 6 e 7 de maio de 2013. O PVe foi encontrado na Fazenda Santo Antônio, município de Rondonópolis nas proximidades do Rio Vermelho em área sob pastagem sendo as coletas realizadas entre 11 e 12 de junho de 2013.

Na Tabela 3 são apresentados resultados analíticos de granulometria do solo para os horizontes identificados e as cores identificadas com a carta de cores Munsell (1994).

Tabela 3 – Cores e participação das frações granulométricas nos horizontes identificados nas trincheiras

Solo	Horizonte	Profundidade, m	Cor Úmida	Areia Grossa ^{†*}	Areia Fina	Silte	Argila
				g kg ⁻¹			
LVd1	A	0 a 0,18	2.5 YR 4/4	108	100	75	717
	ABw	0,18 a 0,40	2.5 YR 4/6	86	92	78	744
	BwA	0,40 a 0,60	2.5 YR 4/8	75	92	66	767
	Bw	> 0,60	2.5 YR 4/8	76	97	31	796
LVd2	A	0 a 0,17	2.5 YR 4/4	189	681	18	112
	ABw	0,17 a 0,81	2.5 YR 4/4	164	683	27	126
	BwA	0,81 a 1,17	2.5 YR 4/8	174	671	29	126
	Bw	> 1,17	2.5 YR 4/8	183	652	14	151
LAd	A	0 a 0,21	10 YR 4/4	325	204	15	456
	ABw	0,21 a 0,40	10 YR 5/4	290	191	39	480
	BwA	0,40 a 0,85	10 YR 6/6	251	176	33	540
	Bw	> 0,85	10 YR 6/8	233	168	16	583
PVe	A	0 a 0,15	7.5 YR 2.5/2	221	358	111	187
	A1	0,15 a 0,25	5 YR 2.5/2	188	403	257	152
	BtA1	0,25 a 0,55	2.5 YR 3/4	188	397	212	203
	Bt	0,55 a 0,78	2.5 YR 4/3	147	328	115	410
	BtC	0,78 a 1,25	2.5 YR 4/6	125	351	160	364
	C	> 1,25	2.5 YR 5/6	110	378	204	308

[†]Método do densímetro conforme apresentado em Camargo et al. (2009)

*Areia grossa 0,25 a 2,0 mm, Areia fina 0,05 a 0,25 mm, Silte 0,002 a 0,05mm, Argila < 0,002 mm

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de análises químicas utilizados na classificação dos solos. Os solos LVd1 e LVd2 apresentaram menores valores de nutrientes e maior acidez que os demais, com elevada saturação por alumínio nos horizontes subsuperficiais. Para o horizonte Bw do LAd destacou-se o valor de pH em água ser menor que aquele em KCl, indicativo do saldo de cargas ser positivo, reduzindo a capacidade deste solo em armazenar nutrientes.

Tabela 4 – Parâmetros químicos obtidos na análise de terra coletada nos horizontes identificados nas trincheiras

Solo	Horizonte	Profundidade	pH H ₂ O*	pH KCl	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
		m			mg kg ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹							%	
LVd1	A	0 a 0,18	5,1	4,2	3	0,9	19	9	6	74	28,6	102,8	28	18
	ABw	0,18 a 0,40	4,8	4,1	1	0,5	4	5	11	51	9,1	60,1	15	54
	BwA	0,40 a 0,60	4,9	4,2	1	0,3	<2	2	8	38	3,4	41,4	8	69
	Bw	> 0,60	4,8	4,3	1	0,3	2	2	4	28	4,1	31,7	13	48
LVd2	A	0 a 0,17	5,9	5,1	30	0,5	14	4	<1	15	18,8	33,5	56	0
	ABw	0,17 a 0,81	4,6	4,1	2	<0,3	<2	<1	5	15	1,3	16,0	8	78
	BwA	0,81 a 1,17	4,5	4,1	1	<0,3	<2	<1	4	12	1,3	13,3	9	75
	Bw	> 1,17	4,7	4,1	1	<0,3	<2	<1	2	10	1,4	11,8	12	57
LAd	A	0 a 0,21	6,3	5,7	1	0,8	25	7	<1	12	33,5	45,6	73	0
	ABw	0,21 a 0,40	6,5	6,0	<1	0,7	13	5	<1	12	18,9	31,0	61	0
	BwA	0,40 a 0,85	6,0	5,6	1	0,4	6	3	<1	15	9,7	24,4	40	0
	Bw	> 0,85	6,2	6,3	<1	0,4	6	2	<1	<10	8,9	18,4	48	0
PVe	A	0 a 0,15	5,9	4,8	2	5,6	51	10	<1	35	66,8	102,2	65	1
	A1	0,15 a 0,25	5,9	4,9	2	2,7	41	6	<1	25	49,1	74,2	66	2
	BtA	0,25 a 0,55	6,1	5,5	1	2,6	32	6	<1	12	40,1	52,2	77	0
	Bt	0,55 a 0,78	6,2	5,1	1	3,8	30	18	<1	15	51,0	67,5	78	0
	BtC	0,78 a 1,25	6,4	5,2	2	4,2	14	23	<1	15	41,3	56,3	74	0
	C	> 1,25	6,5	5,6	1	3,7	8	20	<1	10	31,4	41,8	75	0

*Determinações segundo EMBRAPA (1997)

Para avaliar o tipo de argilomineral predominante e o grau de intemperismo foi realizado o ataque sulfúrico de amostras coletadas no horizonte diagnóstico de cada solo e o cálculo dos quocientes Ki e Kr. Os coeficientes Kr foram 0,99, 0,83, 0,40, 1,49 respectivamente para os solos LVd1, LVd2, LAd e PVe e os coeficientes Ki foram 1,18, 1,18, 0,45, 2,10 também respectivamente. Segundo Resende e Santana, (1988) solos com Ki e Kr acima de 0,75 são considerados cauliniticos e solos com Ki e Kr abaixo de 0,75 são gibbsíticos. Os baixos valores encontrados para o LAd demonstra ser este o solo onde o intemperismo é mais avançado, ocorrendo o oposto para o PVe e valores intermediários para os LVd.

Os teores de carbono nos horizontes A foram 21, 4, 10 e 22 g kg⁻¹ de terra respectivamente para LVd1, LVd2, LAd e PVe, demonstrando a fragilidade do LVd2 em relação aos demais solos e o acúmulo mais pronunciado no PVe sob pastagem. Apesar da

baixa participação da fração argila e do pequeno montante de carbono no LVd2, a CTC do horizonte diagnóstico não difere muito daquela encontrada no LAd, apesar deste ser argiloso. Tal fato corrobora o avançado estágio de intemperismo em que este último solo se encontra.

A terceira etapa do trabalho foi realizada no talhão 17 da Fazenda Guarita, no município de Rondonópolis, MT. Selecionou-se uma porção que apresentava variação em granulometria. Foi estabelecida uma malha com 90 pontos espaçados em 30 m, sendo a locação realizada com receptor GPS. A malha definiu uma área retangular com 15 pontos em sua maior dimensão e 6 na menor, com coordenadas centrais, latitude S16°39'60" e longitude O58°38'41" com altitude de 481 m. Nesta região predomina o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, segundo SEPLAN (2001).

3.2 Instrumentos utilizados

O equipamento utilizado nas determinações de resistência elétrica foi o testador de aterramento modelo 1625 fabricado pela empresa Fluke. A resistência é determinada pela medição da tensão e da corrente em arranjo com 4 eletrodos, sendo dois para injeção e mensuração da corrente e dois para mensuração da diferença de potencial. A medição é realizada com uma corrente alternada de pulso quadrado com 48 ou 20 V de tensão e frequências opcionais de 94, 105, 111 ou 128 Hz, em todas as avaliações mantida em 94 Hz. O equipamento apresentava capacidade de mensuração de resistências entre 0,02 Ω e 299,9 k Ω , com resolução variando desde 0,001 até 100 Ω em função da faixa de medição, o erro operacional máximo é de $\pm 5\%$ da leitura, segundo especificação do fabricante.

A mensuração da temperatura foi realizada com um termômetro digital do fabricante Testo, modelo 926 e sonda de contato termopar do tipo T, apresentando resolução de 0,1 °C e exatidão de $\pm 0,3$ °C na faixa de -20 a 70°C, segundo especificação do fabricante.

Utilizou-se um condutímetro de bancada modelo AJX-515 do fabricante Micronal para a confecção de soluções padrão de condutividade elétrica. O equipamento permite a mensuração em uma faixa desde 0 a 2000 mS m⁻¹, com resolução de 0,5% da escala total, segundo o fabricante.

Para a pesagem das amostras foi utilizada uma balança da marca Shimadzu, modelo BL3200H, com resolução de 0,01 g e erro máximo de 0,03 g, segundo o fabricante.

A locação dos pontos na malha foi realizada com um receptor GPS do fabricante Trimble, modelo CFX 750, habilitado para receber informações de correção do

posicionamento via satélite, permitindo acurácia de 0,04 m no posicionamento horizontal e 0,1 m no posicionamento vertical, segundo o fabricante.

3.3 Determinações em laboratório

3.3.1 Amostras indeformadas

Metade das amostras indeformadas coletadas foi utilizada para obter informações sobre a distribuição de poros e resistência mecânica à penetração dos solos.

A densidade de partícula (D_p , Mg m^{-3}), foi obtida através de um picnômetro de gás hélio (ACCUPYC, 1330, Micrometrics Instrument Corporation), empregando uma alíquota de 0,007 kg de terra fina seca em estufa obtida das amostras de solo removidas dos cilindros. Para cada profundidade e solo foi obtida uma amostra, totalizando 20 determinações.

Para todas as amostras foram realizadas determinações de umidade gravimétrica (θ_g , g kg^{-1}) densidade do solo (D_s , Mg m^{-3}) e umidade volumétrica (θ_v , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), segundo a metodologia apresentada por Camargo et al. (2009), com os cálculos apresentados nas eq. 14 a 16 e a porosidade total do solo (PT , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi obtida pela eq. 17.

$$\theta_g = \frac{(\text{Peso amostra úmida}) - (\text{Peso amostra seca})}{(\text{Peso amostra seca})} \quad (14)$$

$$D_s = \frac{\text{Peso amostra seca}}{\text{Volume}} \quad (15)$$

$$\theta_v(\%) = \theta_g \times D_s \quad (16)$$

$$PT = 1 - \frac{\text{densidade do solo}}{\text{densidade de partículas}} \quad (17)$$

A umidade volumétrica em condição de saturação e nas tensões de 3, 6 e 10 kPa foi determinada em laboratório utilizando-se uma mesa de tensão. O percentual do volume do solo com poros ocupados com água na tensão de 6 kPa foi considerado como microporosidade, ou seja percentual do volume de poros cujo diâmetro equivalente é $\leq 0,05$ mm. A macroporosidade foi obtida através da diferença entre a PT e a microporosidade. A

saturação relativa (SR, %) expressa o percentual da PT ocupado por água, sendo obtido pelo quociente entre umidade volumétrica e a PT (LIBARDI, 2012). Determinou-se ainda os percentuais do volume de poros com diâmetros equivalentes maiores que 0,1 mm, entre 0,05 e 0,1 mm, entre 0,03 e 0,05 mm e menores que 0,03 mm.

A resistência do solo à penetração (RP , Mpa), foi determinada na condição de umidade do solo onde a tensão era de 10 kPa, utilizando um penetrômetro eletrônico, com velocidade de penetração constante de $0,17 \text{ mm s}^{-1}$, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semiângulo de 30° .

A participação das frações granulométricas areia, silte e argila foram obtidas para quatro amostras por profundidade e solo através do método do densímetro conforme apresentado em Camargo et al. (2009), obtendo-se as frações Areia 0,05 a 2,0 mm, Silte 0,002 a 0,05mm e Argila $< 0,002 \text{ mm}$.

3.3.2 Amostras para fins de caracterização química

Para avaliar o efeito de parâmetros químicos do solo sobre os valores de CEa foram coletadas amostras de solo nas trincheiras, ao longo das paredes e imediatamente ao lado dos locais de coleta dos cilindros, nas profundidades de 0,05, 0,25 e 0,45 m. Um total de 36 amostras foram coletadas, sendo três amostras em cada profundidade por solo. Foram determinados pH em H_2O , pH em KCl, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, SB, CTC, V e m, segundo EMBRAPA 1997 o pH em CaCl e a M.O. segundo Camargo et al. (2009).

3.3.3 Amostras para fins de caracterização da umidade e granulometria

As amostras de solo coletadas na malha em três sub amostras para cada um dos 90 pontos nas profundidades de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m e 0,6 a 0,8 m foram homogeneizadas, uma porção de 0,150 kg foi tomada para determinação da umidade gravimétrica utilizando a eq. 14, após secagem em estufa a 105°C por 48 h. As amostras da primeira coleta foram enviadas ao laboratório para determinação da granulometria pelo método do densímetro conforme apresentado em Camargo et al. (2009), obtendo-se as frações Areia 0,05 a 2,0 mm, Silte 0,002 a 0,05mm e Argila $< 0,002 \text{ mm}$.

3.4 Determinações referentes à CEa

3.4.1 CEa em amostras indeformadas

A etapa inicial do trabalho envolveu o desenvolvimento de uma metodologia para obter valores de condutividade elétrica em amostras indeformadas. Rhoades et al. (1977) utilizou amostras indeformadas, porém em câmaras de vácuo, para desenvolver a modelagem necessária à compreensão da relação entre CEa e outros atributos. O método permitiu alterar a umidade e condutividade elétrica da solução do solo em cada amostra. Giao et al. (2003) utilizaram amostras indeformadas para caracterizar a resistividade elétrica de argilas coletadas em ambiente marinho. Eles ressaltam a falta de trabalhos e procedimentos para este tipo de determinação e demonstram que os resultados obtidos são compatíveis com aqueles da sondagem vertical.

Seladji et al. (2010) utilizaram cilindros de PVC com 150 mm de diâmetro e dois tipos de arranjo de eletrodos para avaliar o efeito da densidade do solo nos valores de CEa. Por não utilizarem um coeficiente de célula necessitaram eliminar matematicamente o efeito de borda das paredes do cilindro sobre os valores de CEa. Para evitar o efeito da condutividade elétrica da solução os autores utilizaram água destilada para elevar a umidade do solo aos níveis desejados.

As medidas de resistência elétrica foram realizadas com um arranjo de quatro eletrodos posicionados nas extremidades de cilindros de PVC com 0,05 m de diâmetro e altura. Conforme apresentado na Figura 6, foi produzido um suporte e os eletrodos, confeccionados em aço inoxidável, presos a um suporte produzido em material isolante permitindo manter a distância de separação e de penetração fixas durante as mensurações.

Figura 6 – Esquema representativo do conjunto de eletrodos e suporte produzidos para realizar mensuração da resistência elétrica em amostras indeformadas de solo

Para obter os valores de condutividade elétrica determinou-se um coeficiente de célula, k , através da mensuração da resistência elétrica utilizando o arranjo de eletrodos confeccionado em soluções com condutividades elétricas conhecidas, depositadas dentro dos cilindros empregados para a coleta das amostras. Três soluções com as condutividades de $0,5 \text{ mS m}^{-1}$, $2,15 \text{ mS m}^{-1}$ e 20 mS m^{-1} foram depositadas em 12 cilindros tomados aleatoriamente entre aqueles utilizados nas coletas de solo, perfazendo quatro repetições para cada condutividade elétrica. As mensurações de resistência elétrica foram realizadas nas duas extremidades do cilindro, utilizando-se o valor médio destas duas medidas por cilindro. A temperatura foi mantida constante em 21°C . Os valores de k foram determinados para cada repetição e condutividade elétrica conforme a eq. 18, em que CE_t é a condutividade elétrica de uma solução com condutividade conhecida em uma temperatura padrão, R_t é a resistência elétrica mensurada também levada a uma temperatura padrão.

$$k = \frac{CE_t}{R_t} \quad (18)$$

Corwin e Lesch (2005) apresentam uma equação simples para ajustar a condutividade elétrica da solução em função da temperatura, podendo ser empregada também para o ajuste da resistência elétrica, como apresentado na eq. 19, em que $R_{t_{25}}$ é a resistência elétrica da

solução corrigida para 25°C, f_t um fator de correção e R_t a resistência mensurada na temperatura ambiente.

$$R_{25} = f_t * R_t \quad (19)$$

O cálculo de f_t foi realizado com a eq. 20, onde T é a temperatura ambiente. A eq. 3 foi obtida pela inversão daquela proposta por Sheets e Hendrickx (1995) para a CEa.,

$$f_t = \frac{1}{0,4470 + 1,4034 * e^{-T/26,815}} \quad (20)$$

Os resultados apresentaram desvio padrão de 230, coeficiente de variação de 1,5% e distribuição normal, conforme o teste de Shapiro-Wilk. O intervalo de confiança para 1% de probabilidade de erro pelo teste t apresentou os extremos de 15124 e 15537. Adotou-se o valor médio de 15331 nos cálculos de condutividade elétrica para todos os cilindros.

Na Figura 7 é apresentada a relação entre os valores reais e valores preditos para as amostras utilizadas na determinação do coeficiente k . Utilizou-se metade dos valores obtidos nas mensurações para calcular o coeficiente e metade para sua validação. O modelo de regressão linear foi significativo a 0,1% de probabilidade com coeficiente de regressão de 0,998 e erro médio de 0,37 mS m⁻¹.

Figura 7 – Relação entre os valores de condutividade elétrica das soluções padrão utilizadas e aqueles preditos através do coeficiente k, metade dos dados coletados foi utilizada para gerar o coeficiente e metade para produzir a regressão

A coleta das amostras foi realizada em duas trincheiras e duas paredes por trincheira, para cada solo. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0,05 m, 0,25 m, 0,45 m, 0,65 m e 0,85 m, em seis subamostras por trincheira e profundidade compondo 12 subamostras para cada local e profundidade, totalizando 240 cilindros, 60 em cada solo. Metade destes cilindros foi utilizada para as determinações de CEa e o restante para determinações visando sua caracterização física. Os cilindros para coleta foram confeccionados a partir de tubos de PVC com altura de 0,05 m, diâmetro interno de 0,047 m e externo de 0,05 m. Cada cilindro teve uma de suas extremidades afilada para facilitar a penetração no solo. Os cilindros foram identificados, suas dimensões e o peso determinados. Para inserir os cilindros nas paredes utilizou-se um esticador hidráulico da marca Marconi, modelo MEH-6, com capacidade de aplicar 6000 kg de carga com acionamento manual, possuindo curso do pistão de 0,105 m. Utilizou-se a parede oposta àquela onde as amostras foram coletadas como apoio para o esticador, paredes estas não amostradas.

Imediatamente antes da inserção dos cilindros em cada parede, uma porção de 0,05 m foi removida e a parede regularizada com o uso de uma régua de madeira sendo as profundidades demarcadas. Todos os cilindros de cada parede foram inseridos e removidos com a maior brevidade possível, passando-se na sequência para a próxima parede. Esta estratégia visou evitar a perda da umidade natural do solo. Na medida em que as amostras foram retiradas de cada parede procedeu-se à remoção do material excessivo, embalagem em

filmes de PVC e acondicionamento em caixa térmica. Na Figura 8 é apresentada a operação de coleta com o cilindro hidráulico e uma parede onde os cilindros inseridos estavam sendo removidos.

Figura 8 – Coleta de amostras indeformadas com cilindros de PVC e esticador hidráulico

Para a saturação das amostras foi utilizada água pura, com condutividade elétrica de $0,03 \text{ mS m}^{-1}$. Esta condutividade é menor que aquela da água de precipitação na região de Cuiabá, que dista em aproximadamente 200 km do local onde o trabalho foi desenvolvido e que apresentou valores oscilando entre $0,29$ e $10,05 \text{ mS m}^{-1}$ ao longo do período chuvoso, segundo Dias (2011).

Cada amostra foi colocada em um recipiente com capacidade volumétrica de 0,2 L, recebendo o volume de 0,1 L da água pura. A mensuração da resistência elétrica para cálculo da CEa foi realizada em laboratório, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Mensuração da resistência elétrica em amostras indeformadas

3.4.2 CEa em paredes de trincheiras

Visando a obtenção de valores pontuais da CEa em profundidade foram realizadas mensurações de resistência elétrica nas paredes das trincheiras empregando o arranjo de Wenner.

O acesso realizado por meio de trincheiras permitiu a obtenção de mensurações pontuais ao longo do perfil. Conforme apresentado na Figura 5, duas paredes por trincheira foram utilizadas, perfazendo quatro paredes em cada solo, todas voltadas para o centro. Em cada parede foram realizadas cinco subamostras de resistência elétrica nas profundidades de 0,05, 0,15, 0,25, 0,35, 0,45, 0,55, 0,65, 0,75, 0,85 e 0,95 m. As subamostras foram tomadas lado a lado, de modo a caracterizar toda a largura da parede em cada profundidade. Foi construído um suporte para facilitar o trabalho, conforme apresentado na Figura 10. O suporte foi confeccionado em material isolante e os eletrodos em aço inoxidável, com diâmetro de 4 mm, tendo as pontas afiadas para facilitar a inserção. Havia a possibilidade de ajustar a profundidade de penetração dos eletrodos, que após algumas tentativas, foi definida em 0,015 m pela facilidade de inserção e simultânea estabilidade nas leituras, com bom contato dos eletrodos, preservando a integridade das paredes. A distância entre eletrodos foi mantida em 0,05 mm, buscando obter amostras pontuais, com profundidade de prospecção compatível àquela das amostras indeformadas tomadas na sequência.

Figura 10 – Representação do arranjo de eletrodos utilizado para as mensurações de resistência elétrica nas paredes das trincheiras

Simultaneamente à mensuração de resistência elétrica foram tomadas medidas de temperatura através de um termômetro de contato, nos mesmos locais. Os valores de resistência elétrica, R , em ohm, de cada parede e profundidade, foram corrigidos para a temperatura de 25° C, R_{25} , a partir da eq. 19,e eq. 20.

Os valores de R_{25} , distância de separação e profundidade dos eletrodos foram utilizados para o cálculo da resistividade elétrica, ρ , em ohm m⁻¹, através das eq. 13.

Os valores de ECa foram obtidos pela inversão dos dados de resistividade elétrica e ajuste da unidade para mS m⁻¹.

3.4.3 CEa na superfície do solo

As medidas de resistência elétrica na superfície foram tomadas em seis repetições para cada solo, conforme apresentado na Figura 5. As distâncias de separação entre os eletrodos foram estabelecidas visando obter profundidades de prospecção compatíveis com aquelas de coleta das amostras indeformadas e medidas de resistência elétrica nas paredes das trincheiras. Dentre as relações na literatura para as distâncias de separação e profundidades de prospecção foram avaliadas aquelas apresentadas por Szalai, Novák e Szarka (2009) e definidas por Roy e Apparao (1971) como profundidade de maior sensibilidade, z^* , ($z^*/R = 0,105$) e por Edwards (1977) como a profundidade efetiva de prospecção, ze , ($ze/R=0,175$), sendo R a distância de separação entre os eletrodos de corrente ($R = 3 \times a$). Utilizando a eq. 21, apresentada em Sudduth et al. (2005), foi determinada a separação entre os eletrodos para que 90% do sinal de resposta estivesse até a profundidade desejada, z_{90} , em que R_w é a resposta relativa, L a distância entre os eletrodos de corrente, em metros, e z a profundidade, também em metros.

$$R_w = \left(\frac{8Lz}{3}\right) \left(\left(\frac{L^2}{9} + 4z^2\right)^{-3/2} - \left(\frac{4L^2}{9} + 4z^2\right)^{-3/2} \right) \quad (21)$$

A adoção das três relações entre profundidade de prospecção e separação entre os eletrodos buscou a comparar dos valores de CEa obtidos na superfície com aqueles mensurados ao longo das paredes das trincheiras. As distâncias de separação e profundidades correspondentes são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Códigos de identificação, distâncias de separação utilizadas e profundidades de prospecção correspondentes

Gabarito	Código	Separação “a”	$\dagger Z^* = 0,105 \times 3 \times a$	$\dagger Z_e = 0,175 \times 3 \times a$	$\dagger Z_{90}$
		m			
1	A	0,16	0,05*	0,08	0,21
	B	0,48	0,15	0,25	0,65
	C	0,79	0,25	0,41	1,06
	D	1,11	0,35	0,58	1,49
	E	1,43	0,45	0,75	1,92
	F	1,75	0,55	0,92	2,36
	G	2,06	0,65	1,08	2,77
	H	2,38	0,75	1,25	3,2
	I	2,70	0,85	1,42	3,63
2	A	0,10	0,03	0,05	0,13
	B	0,29	0,09	0,15	0,39
	C	0,48	0,15	0,25	0,65
	D	0,67	0,21	0,35	0,9
	E	0,86	0,27	0,45	1,16
	F	1,05	0,33	0,55	1,41
	G	1,24	0,39	0,65	1,67
	H	1,43	0,45	0,75	1,92
	I	1,62	0,51	0,85	2,18
3	A	0,11	0,03	0,06	0,15
	B	0,19	0,06	0,10	0,25
	C	0,26	0,08	0,14	0,35
	D	0,34	0,11	0,18	0,45
	E	0,41	0,13	0,22	0,55
	F	0,49	0,15	0,26	0,65
	G	0,56	0,18	0,29	0,75
	H	0,64	0,20	0,34	0,85

$\dagger$ Segundo Szalai, Novák e Szarka (2009), $\dagger$ Segundo Sudduth et al.(2005), *Em negrito profundidades correspondentes àquelas das medidas nas paredes das trincheiras

Eletrodos foram confeccionados com a finalidade de facilitar a inserção no solo e manutenção da mesma profundidade em todas as mensurações. Utilizou-se barras de aço inoxidável com diâmetro de 8 mm para a confecção de hastes que foram afiadas em uma extremidade e receberam uma proteção na outra, permitindo a inserção através de impactos quando necessário. O esquema representativo dos eletrodos é apresentado na Figura 11. Um limitador de profundidade produzido em material isolante assegurou a profundidade de inserção de 0,1 m, em todas as determinações. Durante as mensurações de resistência orifícios de acesso foram abertos para mensurar a temperatura a cada 0,1 m até a profundidade de 1,0 m. Como os valores de temperatura apresentaram variação inferior a 2° C, entre 26 e 28°C, desde a superfície, utilizou-se o valor médio de todas as profundidades e de duas determinações em cada solo. Os valores de resistência elétrica, R , em ohm, foram corrigidos para a temperatura de 25° C, R_{25} , utilizando-se a eq. 19 e a eq. 20.

Figura 11 – Esquema dos eletrodos utilizados para as mensurações de resistência elétrica na superfície, a é a separação entre eletrodos e b a profundidade de inserção no solo

Para evitar erros e tornar mais rápidas as determinações em campo, três gabaritos foram criados perfurando fitas de polietileno nas separações desejadas, conforme apresentado na Figura 12. As mensurações foram realizadas das separações maiores para as menores.

Figura 12 – Eletrodos e gabaritos em uso nas mensurações de resistência elétrica na superfície

O mesmo conjunto de eletrodos foi empregado nas determinações da CEa no estudo da variabilidade espacial.

3.4.4 CEa no estudo de variabilidade espacial

A área selecionada para o trabalho apresentou gradiente bem definido de granulometria do solo, com maior participação da fração argila na região norte, porção mais baixa da área do estudo. Foi estabelecida uma malha com 90 pontos espaçados em 30 m, definindo uma forma retangular com 15 pontos em sua maior dimensão e seis pontos na menor, apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Malha de pontos locados e mapa de elevação da área de estudo

Para cada condição de umidade do solo foram realizadas quatro determinações de resistência elétrica em cada ponto da malha e distância de separação dos eletrodos. Um raio de 4 m em relação à coordenada do ponto foi adotado como limite (Figura 14). As distâncias de separação foram definidas em função das relações para as distâncias de separação e profundidades de prospecção apresentadas por Szalai, Novák e Szarka (2009) e definidas por Roy e Apparao (1971) como profundidade de maior sensibilidade, z^* , ($z^*/R = 0,105$) e por Edwards (1977) como a profundidade efetiva de prospecção, ze , ($ze/R=0,175$), sendo R a distância de separação entre os eletrodos de corrente ($R = 3 \times a$). Em função das relações, as distâncias de separação entre os eletrodos foram de 0,19, 0,32, 0,57, 0,95, 1,33, 1,59 e 2,22 m e a profundidade do eletrodo em relação à superfície do solo foi mantida em 0,10 m. As distâncias de separação foram definidas para contemplar o objetivo de caracterizar a CEa nas profundidades de 0,1, 0,3, 0,5 e 0,7 m.

Mensurações da temperatura do solo foram realizadas junto às de resistência elétrica, em quatro horários ao longo do dia, nas profundidades de 0,1, 0,3, 0,5 e 0,7 m com o auxílio

de um trado do tipo holandês para abrir orifícios de acesso. Os dados de resistência elétrica foram corrigidos para a temperatura padrão utilizando a eq. 19 e a eq. 20. Adotou-se para cada ponto os valores de temperatura mais próximos no tempo. A temperatura correspondente a cada distância de separação dos eletrodos foi considerada com base na relação teórica entre distância de separação dos eletrodos e profundidade mediana de prospecção, ou seja, a profundidade sendo metade da distância de separação dos eletrodos de corrente. Utilizou-se a média dos valores de temperatura obtidos em profundidade igual e inferior à profundidade teórica de prospecção.

As mensurações de resistência elétrica na condição em que o solo estava com maior umidade denominada “condição úmida” ocorreram entre dias 3 e 5 abril de 2013 e aquelas da condição com menor umidade denominada “condição seca” ocorreram entre os dias 17 e 20 de julho de 2013. Na condição úmida havia palha da cultura de soja colhida nas duas semanas anteriores sobre o solo e na condição seca, havia o cultivo de *Crotalaria ochroleuca* como cultura de cobertura, sendo realizada a roçagem com uma roçadora manual em um raio de 8 m ao redor de cada ponto amostral da malha duas semanas antes da mensuração.

Figura 14 – Mensuração da resistência elétrica em um dos pontos da malha e sondas utilizadas na amostragem do solo

Amostras de solo foram coletadas para determinação da umidade gravimétrica e da participação das frações granulométricas. Coletas foram realizadas simultaneamente à mensuração da resistência elétrica na primeira condição e uma semana após a mensuração da resistência elétrica na segunda condição. A coleta das amostras de solo foi realizada com duas sondas manuais, para profundidades de até 0,4 e até 0,6 m. Estas sondas permitiram a coleta estratificada do solo a cada 0,2 m, até 0,6 m. Para a coleta das amostras entre 0,6 e 0,8 m

foram abertas trincheiras até 0,2 m inserindo a sonda de 0,6 m a partir do fundo destas para atingir a camada entre 0,6 e 0,8 m. Três subamostras foram utilizadas para compor a amostra representativa de cada ponto e profundidade, em cada condição de umidade. As amostras foram condicionadas em sacos plásticos e lacradas para impedir a perda de umidade.

3.5 Métodos estatísticos

A análise dos dados buscou identificar a relação entre os locais investigados, entre os métodos de mensuração da CEa e entre os diversos atributos levantados com as amostras indeformadas e a CEa. Análises descritivas foram realizadas para os atributos obtidos nas amostras indeformadas e para a CEa obtida para cada um dos métodos, bem como para estudo da variabilidade espacial.

A identificação de diferenças entre os atributos do solo e CEa investigados através das amostras indeformadas foram realizadas através da análise de variância e testes de comparação de médias. A análise de variância também foi utilizada para identificar diferenças nos valores de CEa em função da distância de separação entre os eletrodos e entre os solos, nas avaliações realizadas na superfície. Diferenças de CEa entre profundidades e solos nas avaliações com eletrodos cravados nas paredes também foram quantificadas. A existência de relação entre os atributos levantados e entre os métodos de mensuração foram avaliadas através da análise de correlação e de regressões. As análises estatísticas foram realizadas com o programa JMP®6.0 (SAS INSTITUTE, 2005).

No estudo de variabilidade espacial foram utilizadas técnicas para caracterização da variabilidade espacial, predição e correlação entre os atributos levantados. Para a obtenção dos semivariogramas foi utilizado o software VESPER 1.6, e o software SURFER versão 8.0, Golden Software Inc. 2002. Para as predições espaciais utilizou-se o software SURFER versão 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

3.5.1 Estatística descritiva

Os indicadores selecionados para representar de modo conciso as características do conjunto de dados obtidos no processo de amostragem foram a média, mediana, menor valor, maior valor, amplitude, valores do quartil superior e inferior, desvio padrão, assimetria e curtose. Calculou-se ainda o coeficiente de variação e procedeu-se ao teste de Shapiro-Wilk para avaliar se os conjuntos de dados apresentavam distribuição normal.

Em cada um dos quatro solos foram caracterizados as variáveis CEa, umidade volumétrica e SR para as três condições de umidade das amostras indeformadas. Ainda para as amostra indeformadas os parâmetros Argila, Silte, Areia, Ds, RP, PT, microporosidade, macroporosidade, percentual de poros menores que 0,03 mm, percentual de poros com diâmetro entre 0,03 e 0,05 mm, entre 0,05 e 0,1 mm e maiores que 0,1 mm.

Os valores de CEa obtidos nas amostragens realizadas nas paredes das trincheiras e na superfície foram também descritos estatisticamente para cada solo com duas abordagens quanto ao número de amostras. Na primeira delas utilizaram-se todos os resultados da amostras coletadas nas paredes e em superfície e na segunda apenas aquelas limitadas pela maior profundidade de coleta das amostras indeformadas, sendo esta definição em função dos resultados obtidos neste trabalho.

No estudo da variabilidade espacial foram caracterizados os parâmetros CEa para as sete distâncias de separação entre os eletrodos em duas condições de umidade do solo. Teores de argila, silte e areia obtidos nas quatro profundidades amostradas, 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m e 0,6 a 0,8 m e os teores médios, para camadas desde a superfície até as profundidades de coleta subsequentes, 0 a 0,4 m, 0 a 0,6 m e 0 a 0,8 m. As mesmas profundidades e camadas foram obtidas para a umidade gravimétrica porém em duas condições de umidade.

3.5.2 Análises de variância

Para as amostras indeformadas, análises de variância foram realizadas para identificar efeitos do tipo de solo, profundidade de coleta e umidade sobre as variáveis Ds, PT, RP, argila, silte, areia, microporosidade, macroporosidade, percentual de poros menores que 0,03 mm, percentual de poros com diâmetro entre 0,03 e 0,05 mm, entre 0,05 e 0,1 mm e maiores que 0,1 mm, CEa, umidade volumétrica e SR.

O primeiro grupo de análises considerou o solo como causa de variação, mantendo-se fixas as profundidades. O delineamento foi o de blocos ao acaso, com dois blocos para cada tipo de solo. Havia três repetições em cada bloco, totalizando 23 graus de liberdade. Avaliou-se o efeito de cada tipo de solo para Ds, PT, argila, silte, areia, microporosidade, macroporosidade, percentual de poros menores que 0,03 mm, percentual de poros com diâmetro entre 0,03 e 0,05 mm, entre 0,05 e 0,1 mm, poros maiores que 0,1 mm e RP, esta última tomada para uma mesma tensão de água no solo.

O segundo grupo de análises considerou a profundidade como causa de variação, mantendo-se fixo o solo. O delineamento foi o de blocos ao acaso, com dois blocos para cada

tipo de solo. Havia três repetições em cada bloco, totalizando 29 graus de liberdade. Avaliou-se o efeito de cada profundidade para Ds, PT, Argila, Silte, Areia, microporosidade, macroporosidade, percentual de poros menores que 0,03 mm, percentual de poros com diâmetro entre 0,03 e 0,05 mm, entre 0,05 e 0,1 mm, poros maiores que 0,1 mm e RP, esta última tomada para uma mesma tensão de água no solo.

Os resultados do primeiro e segundo grupos de análise são apresentados nas Tabelas 26 a 29, com o objetivo de caracterizar os ambientes, sintetizando as informações de propriedades que não oscilam com a condição de umidade.

No terceiro grupo de análises considerou-se a umidade como causa de variação, mantendo-se fixas as profundidades dentro de cada tipo de solo. O delineamento foi o de blocos ao acaso, com dois blocos para cada tipo de solo. Havia três repetições para cada bloco, totalizando 11 graus de liberdade. Avaliou-se o efeito da condição de umidade sobre a CEa, umidade volumétrica e SR.

No quarto grupo de análises considerou-se a profundidade como causa de variação, mantendo-se fixa a condição de umidade dentro de cada tipo de solo. O delineamento foi o de blocos ao acaso, com dois blocos para cada tipo de solo. Havia três repetições para cada solo, totalizando 29 graus de liberdade. Avaliou-se o efeito da profundidade sobre a CEa, umidade volumétrica e SR.

Os resultados do terceiro e quarto grupos de análise são apresentados nas Tabelas 30 e 31, com o objetivo de avaliar o efeito da umidade, sintetizando as informações de propriedades que oscilam com a condição de umidade.

Um quinto grupo de análises foi desenvolvido para avaliar o efeito do tipo de solo, mantendo-se fixa a condição de umidade dentro de cada profundidade. O delineamento foi o de blocos ao acaso, com dois blocos para cada tipo de solo. Havia três repetições para cada solo, totalizando 23 graus de liberdade. Os resultados do quinto grupo de análises são apresentados nas Tabelas 32 e 33.

Para avaliar o efeito das 10 profundidades e dos quatro solos sobre a CEa, nas amostragens realizadas nas paredes da trincheira, realizaram-se dois conjuntos de análises de variância. No primeiro manteve-se o solo fixo, avaliando o efeito da profundidade. Havia dois blocos em cada solo com cinco repetições em cada bloco, totalizando 99 graus de liberdade.

O segundo grupo de análises compreendeu a avaliação do efeito do solo para a CEa, mantendo-se fixa a profundidade. Havia dois blocos em cada solo com cinco repetições em cada bloco, totalizando 39 graus de liberdade.

Os resultados das análises de variância para a CEa obtida nas paredes das trincheiras são apresentados na Tabela 35.

Para avaliar o efeito das 24 distâncias de separação dos eletrodos e dos quatro solos sobre a CEa, nas amostragens realizadas na superfície do solo antes da abertura das trincheiras, realizaram-se dois conjuntos de análises de variâncias. No primeiro manteve-se o solo fixo, avaliando o efeito da distância de separação. Havia dois blocos em cada solo com três repetições em cada bloco, totalizando 143 graus de liberdade.

O segundo grupo de análises compreendeu a avaliação do efeito do solo para a CEa, mantendo-se fixa a distância de separação. Havia dois blocos em cada solo com três repetições em cada bloco, totalizando 23 graus de liberdade. Os resultados das análises de variância para a CEa obtida nas superfície do solo antes da abertura das trincheiras são apresentados na Tabela 36.

A comparação entre os métodos de mensuração da CEa para cada solo, na umidade de campo, através de amostras indeformadas e de amostras coletadas nas trincheiras foi obtida a partir da análise de variância. O fator profundidade foi considerado na análise para a remoção de seu efeito. Para cada profundidade foram tomadas quatro repetições de cada método, totalizando 39 graus de liberdade em cada solo.

Para cada análise de variância é apresentado o p - valor obtido pelo teste F, que pode ser entendido como a probabilidade de erro ao rejeitar a hipótese nula, de que os valores observados para as médias são ao acaso e as médias não diferem. Quando o p-valor obtido na análise de variância foi menor que 0,05 procedeu-se ao teste de comparação múltipla de médias de Tukey ao nível de probabilidade de erro de 5%.

3.5.3 Correlações e regressões

A existência de relacionamento entre a CEa e as variáveis levantadas nas amostras indeformadas foi quantificada através da correlação de Pearson. Três análises de correlação foram realizadas, sendo que na primeira utilizou-se o conjunto de dados contendo todos os valores obtidos nas duas condições de umidade. Na segunda e terceira análises foram utilizados apenas os conjuntos de valores obtidos na condição de umidade elevada e de menor umidade respectivamente.

Para as variáveis que apresentaram correlação significativa, procedeu-se à análise de regressão, ajustando-se modelos polinomiais de grau 2. As regressões foram realizadas com três conjuntos de dados, o primeiro contendo todos os valores obtidos nas duas condições de

umidade, o segundo conjunto foi composto pelos valores obtidos na condição de umidade elevada e o terceiro na condição de menor umidade.

Para estabelecer a relação entre as medidas de CEa obtidas na superfície com aquelas ao longo das paredes das trincheiras, consideradas como referência, realizou-se primeiramente o ajuste de regressões lineares entre os valores obtidos pelos dois métodos. Considerou-se três coeficientes obtidos na revisão de literatura que relacionam as distâncias de separação dos eletrodos com a profundidade de prospecção, ou seja, o valor de k , considerando que z é a profundidade de prospecção e a compreende a distância de separação dos eletrodos, na expressão $z = k * a$. Estes procedimento teve como objetivo identificar a presença de diferença entre os coeficientes para os solos.

Na sequência buscou-se calcular para cada tipo de solo o coeficiente que permitia reduzir os erros nos valores de CEa obtidos entre um método e outro. Simulou-se profundidades utilizando coeficientes oscilando entre 0,25 e 3,0 em passos de 0,05 e obtiveram-se 56 valores para cada distância de separação. Aos 56 perfis de sondagem vertical obtidos foram ajustados polinômios de quinto grau. Calculou-se para cada um destes polinômios os valores de CEa nas profundidades onde havia as medidas de referência, obtidas nas paredes das trincheiras. O erro obtido pelo cálculo da raiz quadrada da média dos desvios elevados ao quadrado (i.e. root mean square error – RMSE) para as nove profundidades utilizadas como referência foi utilizado como parâmetro para definir qual coeficiente foi mais adequado para os solos considerados.

3.5.4 Modelagem e predição espacial

Os resultados das amostragens de CEa, granulometria e umidade do solo foram submetidos à análise de correlação de Pearson antes de proceder à geração das superfícies de predição. Avaliou-se a relação entre a participação da argila e areia na granulometria para cada profundidade e de com os teores das demais profundidades. Correlações foram obtidas também entre a participação das frações argila e areia com a umidade do solo, para as sete camadas consideradas e para duas condições de umidade. Os valores de CEa obtidos para cada separação entre eletrodos foram correlacionados com a participação da fração argila e areia e com a umidade do solo em duas condições de umidade.

A caracterização da presença de dependência espacial e a geração de modelos de semivariogramas permitiram a predição dos parâmetros argila, areia, CEa, e umidade

gravimétrica do solo, estes últimos em duas condições de umidade. No caso da CEa foram criadas superfícies para cada distância de separação entre os eletrodos.

4 RESULTADOS

4.1 Estatística descritiva

Conforme apresentado nas Tabelas 6, 7, 9 e 10, entre os solos avaliados o maior e menor valores para a argila foram de 802 e 88 g kg⁻¹ respectivamente, demonstrando ampla faixa de composição granulométrica entre os solos e profundidades analisados. A variabilidade no teor de argila para um mesmo tipo de solo, determinada pelo coeficiente de variação (CV), oscilou entre 3,3 e 21,2%, com o maior valor para o PVe, seguido do LVd2, LAd e LVd1, havendo menor variação dentro do solo que entre os solos. Para a fração areia o maior e menor valores foram 895 e 167 g kg⁻¹ com maior CV no PVe e menor no LVd2.

A observação dos valores obtidos para as frações granulométricas e para as variáveis Ds, PT, microporosidade e macroporosidade permitem identificar diferenças importantes quanto à estrutura dos solos. O LVd2, apresenta textura arenosa, com a maior densidade e menores valores para porosidade total, com macroporosidade superior à microporosidade. Trata-se de um solo sem desenvolvimento de estrutura, com baixa capacidade de retenção de água e que apresenta baixa variação em suas características estruturais ao longo do perfil, apesar de haver alguma variação no teor de argila que, entretanto é baixo.

Tabela 6 – Resultados da análise estatística descritiva para os parâmetros levantados nas amostragens indeformadas no solo LVd1

Momentos estatísticos	Argila	Silte	Areia	Ds	RP	PT	Micro porosidade	Macro porosidade
	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³	MPa	%	%	
Média	785	34	181	1,11	1,31	58	35	21
Mediana	802	26	179	1,12	1,09	58	35	21
Mínimo	726	10	167	0,95	0,43	52	29	12
Máximo	802	83	204	1,26	2,94	65	38	34
Amplitude	76	73	37	0,31	2,51	13	10	21
Q.Inferior	777	20	175	1,06	0,74	55	34	15
Q. Superior	802	47	188	1,20	1,94	61	37	23
Desvio Padrão	26	20	10	0,09	0,69	3,7	2,5	5,6
Assimetria	-1,42	1,20	0,91	-0,09	0,74	0,0	-1,0	0,7
Curtose	0,79	0,47	0,70	-0,85	-0,50	-1,0	0,7	-0,3
CV (%)*	3,30	60,10	5,30	7,90	52,50	6,4	7,0	27,0
Número	20	20	20	30	30	30	30	30
Prob.<W*	<0,0001	0,0052	0,1894	0,2479	0,0183	0,4155	0,0272	0,1051

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Apesar de fazer parte do mesmo grande grupo, o LVd1, muito argiloso, apresenta características bastantes distintas, com elevada porosidade total, chegando ao valor extremo de 65%, sendo a maior parte de poros com diâmetro menor, como pode ser notado ao comparar a macro e microporosidade. Apresentou ainda baixos valores de densidade e baixo valor médio de RP que apesar de alguns valores mais altos, junto aos 21% de macroporosidade, comprovam a presença de estrutura melhor desenvolvida.

Para o LAd notou-se um comportamento intermediário em relação aos LVd, quanto à macro e micro porosidade. Possuindo textura argilosa, porém com boa participação da fração areia, apresentou menores valores para Ds e RP, que descrevem, como verificado em campo, a presença de estrutura, porém com menor agregação que no LVd1.

Tabela 7 – Resultados da análise estatística descritiva para os parâmetros levantados nas amostragens indeformadas no solo LVd2

Momentos estatísticos	Argila	Silte	Areia	Ds	RP	PT	Micro porosidade	Macro porosidade
	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³	MPa	%	%	
Média	128	18	854	1,51	0,70	43	18	22
Mediana	132	18	849	1,50	0,69	44	18	23
Mínimo	88	10	825	1,43	0,31	39	16	17
Máximo	150	25	895	1,62	1,16	47	21	29
Amplitude	63	15	70	0,19	0,85	7	5	12
Q.Inferior	125	15	840	1,47	0,57	42	17	20
Q. Superior	147	21	863	1,55	0,84	45	19	24
Desvio Padrão	20	4	21	0,05	0,21	2,0	1,4	2,9
Assimetria	-0,87	-0,43	0,80	0,29	0,23	-0,3	0,7	-0,2
Curtose	-0,13	-0,54	-0,24	-0,72	-0,19	-0,8	-0,2	-0,5
CV (%)*	15,80	23,10	2,40	3,30	29,50	4,6	7,5	13,1
Número	20	20	20	30	30	30	30	30
Prob.<W*	0,0073	0,5957	0,0768	0,3989	0,9530	0,5046	0,2283	0,2369

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Tabela 8 – Resultados da análise estatística descritiva para percentuais de volume de poros na porosidade total dos solos LVd1 e LVd2

Momentos estatísticos	LVd1				LVd2			
	Percentual da PT, %				Percentual da PT, %			
	< 0,03 mm	0,03 a 0,05 mm	0,05 a 0,1 mm	>0,1 mm	< 0,03 mm	0,03 a 0,05 mm	0,05 a 0,1 mm	>0,1 mm
Média	59	5	9	28	31	14	25	30
Mediana	57	5	8	28	30	13	24	31
Mínimo	42	3	6	17	24	10	21	18
Máximo	72	8	11	42	43	22	32	39
Amplitude	30	5	6	25	19	13	10	21
Q.Inferior	54	4	7	23	28	12	23	25
Q. Superior	66	5	10	32	35	15	26	34
Desvio Padrão	7,9	0,9	1,6	6,5	4,6	3,6	2,6	5,7
Assimetria	-0,4	1,0	0,1	0,5	1,0	1,2	0,9	-0,4
Curtose	-0,6	4,1	-1,0	-0,1	0,6	0,3	0,5	-0,9
CV, %*	13,5	19,8	18,9	23,0	14,6	25,5	10,5	19,1
Número	30	30	30	30	30	30	30	30
Prob.<W**	0,1938	0,0272	0,3983	0,3723	0,0101	0,0003	0,0694	0,1770

*Coeficiente de variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Com a maior variabilidade entre os quatro solos o PVe apresentou textura média a argilosa, com variação na participação da fração argila que oscilou entre 176 e 401 g kg⁻¹. Os valores do CV para diversas variáveis como RP e microporosidade comprovaram haver variação nas suas características estruturais ao longo do perfil.

Tabela 9 – Resultados da análise estatística descritiva para os parâmetros levantados nas amostragens indeformadas no solo LAd

Momentos estatísticos	Argila	Silte	Areia	Ds	RP	PT	Micro-porosidade	Macro-porosidade
	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³	MPa	%	%	
Média	519	23	459	1,15	1,04	56	28	26
Mediana	551	20	438	1,16	0,90	56	28	28
Mínimo	426	11	382	0,94	0,50	47	24	15
Máximo	602	51	538	1,37	2,08	64	34	35
Amplitude	176	41	156	0,43	1,58	17	9	21
Q. Inferior	479	14	427	1,05	0,61	52	27	21
Q. Superior	551	30	494	1,25	1,41	60	29	30
Desvio Padrão	52	11	48	0,11	0,48	4,2	2,2	5,9
Assimetria	-0,55	1,11	0,60	0,01	0,73	0,0	1,0	-0,5
Curtose	-0,81	0,67	-0,86	-0,84	-0,67	-0,8	0,8	-0,7
CV (%)*	9,90	49,40	10,50	9,40	46,30	7,5	7,7	22,8
Número	20	20	20	30	30	30	30	30
Prob.<W**	0,0236	0,0248	0,0190	0,5974	0,0060	0,6352	0,0032	0,1157

*Coeficiente de Variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk.

Os resultados apresentados para os volumes da porosidade total ocupados por poros com distintas classes de diâmetro, apresentados nas Tabelas 8 e 11, demonstram haver concentração nos extremos avaliados, ou seja, com as maiores participações para poros menores que 0,03 mm e para aqueles com diâmetro superior a 0,1 mm, para todos os solos com exceção do LVd2. Considerando que dentre os caminhos para passagem da corrente elétrica, aquele pelos filmes contínuos apresenta importância, a caracterização das diferenças entre a porosidade dos solos auxilia no entendimento do fenômeno nos solos estudados.

Os valores de curtose foram para as diversas variáveis e solos negativos em sua maior parte, demonstrando maior dispersão dos dados que aquela da distribuição normal. Os valores de assimetria oscilaram entre as variáveis e solos. O teste de normalidade demonstrou que quase metade das variáveis não apresentou distribuição normal. Este fato não era inesperado, dado que os indivíduos são oriundos de populações com características distintas, ou seja, camadas de solo em que os processos de formação atuam de modo distinto, além do fator antrópico, nas camadas mais superficiais.

Tabela 10 – Resultados da análise estatística descritiva para os parâmetros levantados nas amostragens indeformadas no solo PVe

Momentos estatísticos	Argila	Silte	Areia	Ds	RP	PT	Micro porosidade	Macro porosidade
	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³	MPa	%	%	
Média	289	175	536	1,43	1,13	46	26	17
Mediana	251	174	564	1,47	1,07	44	25	17
Mínimo	176	115	428	1,21	0,67	40	20	10
Máximo	401	248	601	1,59	1,85	53	35	22
Amplitude	225	133	173	0,38	1,18	12	15	12
Q.Inferior	251	156	478	1,33	0,93	43	23	14
Q. Superior	351	189	585	1,52	1,31	49	28	19
Desvio Padrão	61	27	59	0,11	0,28	3,6	4,1	3,2
Assimetria	0,32	0,50	-0,58	-0,75	0,81	0,6	0,5	0,1
Curtose	-0,90	2,52	-1,30	-0,77	0,66	-0,9	-0,6	-0,8
CV (%)*	21,20	15,40	10,90	7,90	24,40	8,0	15,9	19,0
Número	20	20	20	30	30	30	30	30
Prob.<W**	0,0206	0,2814	0,0071	0,0040	0,2263	0,0179	0,1559	0,5238

*Coeficiente de variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Tabela 11 – Resultados da análise estatística descritiva para percentuais de volume de poros na porosidade total dos solos LAd e PVe

Momentos estatísticos	LAd				PVe			
	Percentual da PT, %				Percentual da PT, %			
	< 0,03 mm	0,03 a 0,05 mm	0,05 a 0,1 mm	>0,1 mm	< 0,03 mm	0,03 a 0,05 mm	0,05 a 0,1 mm	>0,1 mm
Média	46	7	12	35	55	6	9	31
Mediana	44	7	13	36	55	5	8	30
Mínimo	35	4	7	22	43	4	6	17
Máximo	61	10	16	46	67	10	14	44
Amplitude	26	6	9	24	24	6	9	27
Q.Inferior	41	6	11	32	49	4	7	25
Q. Superior	51	8	14	39	62	7	10	38
Desvio Padrão	7,0	1,1	2,2	6,0	6,9	1,4	2,4	7,1
Assimetria	0,8	-0,3	-0,8	-0,6	-0,1	1,1	1,0	0,0
Curtose	-0,2	2,7	0,7	-0,1	-1,3	0,6	0,0	-0,8
CV, %*	15,3	16,3	17,6	17,4	12,6	25,7	28,1	22,7
Número	30	30	30	30	30	30	30	30
Prob.<W**	0,0206	0,1021	0,1590	0,0714	0,1434	0,0053	0,0058	0,6091

*Coeficiente de variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Os valores obtidos na análise descritiva das variáveis CEa, umidade volumétrica e SR para os quatro solos e em três condições de umidade são apresentados nas Tabelas 12 a 15.

Com exceção do LAd, os demais apresentaram a condição de umidade considerada “baixa” inferior àquela de campo. Isto deve-se ao fato da amostragem neste solo ter ocorrido

em período onde a umidade já se encontrava baixa. De modo geral as determinações realizadas em menor presença de umidade tenderam a apresentar maiores valores para o CV no caso das variáveis umidade volumétrica e CEa. Para esta última foram notadas dificuldades durante a mensuração da resistência elétrica na condição mais seca, com impedimentos à inserção dos eletrodos nas amostras e ocorrência de resistência de contato.

Tabela 12 – Resultados da análise estatística descritiva para os parâmetros levantados nas amostragens indeformadas no solo LVd1 em três condições de umidade

Momentos estatísticos	Condição de Umidade								
	Campo	Elevada	Baixa	Campo	Elevada	Baixa	Campo	Elevada	Baixa
	CEa, mS m ⁻¹			Umidade, m ³ m ⁻³			SR, %		
Média	1,93	4,76	1,11	31,2	48,2	22,1	54,0	83,0	38,0
Mediana	1,24	3,93	0,61	31,0	48,0	21,6	53,2	81,1	37,4
Mínimo	0,21	2,32	0,08	26,7	43,3	17,8	41,5	78,3	30,8
Máximo	6,01	8,88	4,88	35,4	52,5	27,7	67,6	94,5	47,9
Amplitude	5,80	6,56	4,80	8,7	9,2	9,9	26,0	16,1	17,1
Q.Inferior	0,78	2,96	0,36	29,6	46,5	20,2	49,0	79,7	34,6
Q. Superior	2,16	6,5	1,08	33,2	50,1	24,2	60,6	84,9	40,9
Desvio Padrão	1,78	1,98	1,28	2,5	2,2	2,7	7,6	4,8	4,7
Assimetria	1,38	0,59	1,91	-0,1	0,1	0,4	0,1	1,3	0,4
Curtose	0,58	-0,95	2,8	-0,8	-0,4	-0,7	-0,9	0,7	-0,5
CV (%)*	92,30	41,6	115,1	7,9	4,6	12,2	14,0	5,7	12,3
Número	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Prob.<W**	0,2962	0,4037	0,2953	0,5173	0,8293	0,3512	0,2962	<0,0001	0,2953

*Coeficiente de Variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Os valores de CEa foram sempre mais altos quando o solo estava mais úmido, sendo os maiores valores médios nesta condição de umidade 6,14, 4,76, 3,68 e 2,46 mS m⁻¹ para os solos PVe, LVd1, LAd e LVd2, respectivamente. Os valores de SR foram semelhantes na condição mais úmida para todos os solos, o que pode ser entendido como uma redução semelhante de um importante efeito no caminhamento da corrente pela solução do solo sobre a CEa observada.

Ainda na condição de solo com umidade elevada, os valores de CV foram de 81,8, 41,6, 37,4 e 30% para os solos LVd2, LVd1, LAd e PVe, respectivamente. Apesar de possuir maior participação da fração argila em sua constituição, o LVd1 apresentou menores valores médios para a CEa na condição de baixa umidade quando comparado com LAd e PVe, estando estes com umidade volumétrica semelhante e inferior respectivamente.

Tabela 13 – Resultados da análise estatística descritiva para os parâmetros levantados nas amostragens indeformadas no solo LVd2 em três condições de umidade

Momentos estatísticos	Condição de Umidade								
	Campo	Elevada	Baixa	Campo	Elevada	Baixa	Campo	Elevada	Baixa
	CEa, mS m ⁻¹			Umidade, m ³ m ⁻³			SR, %		
Média	0,23	2,46	0,31	9,4	35,8	6,2	21,7	82,7	14,3
Mediana	0,18	1,95	0,14	9,7	35,2	5,7	23,2	81,4	13,1
Mínimo	0,10	1,03	0,05	5,7	32,6	4,2	12,4	75,7	10,0
Máximo	1,10	12,07	2,55	11,1	41,0	10,1	27,0	96,5	24,1
Amplitude	1,00	11,04	2,50	5,4	8,4	5,9	14,5	20,7	14,1
Q.Inferior	0,14	1,41	0,10	9,0	34,4	5,1	20,4	80,4	11,6
Q. Superior	0,24	3,03	0,22	10,5	37,2	7,1	24,0	84,2	16,4
Desvio Padrão	0,18	2,01	0,51	1,6	2,2	1,6	3,7	4,5	3,6
Assimetria	3,96	4,00	3,51	-1,4	1,1	1,2	-1,4	1,3	1,2
Curtose	18,07	18,80	13,50	1,3	0,6	0,9	1,7	1,9	1,1
CV (%)*	79,60	81,80	164,60	16,5	6,1	26,0	17,0	5,5	25,2
Número	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Prob.<W**	0,0003	0,0038	0,0018	0,0004	0,0096	0,0025	0,0003	0,0038	0,0018

*Coeficiente de Variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Para o LVd2 a distribuição dos valores apresentou-se distinta dos demais, com concentração tendendo a valores mais baixos, como pode ser visto pela diferença entre média e mediana e pela assimetria positiva. Nenhuma das variáveis em qualquer condição de umidade apresentou distribuição normal para este solo que apresentou os menores valores de CEa entre os avaliados, ou seja, 0,05 mS m⁻¹.

Tabela 14 – Resultados da análise estatística descritiva para os parâmetros levantados nas amostragens indeformadas no solo LAd em três condições de umidade

Momentos estatísticos	Condição de Umidade								
	Campo	Elevada	Baixa	Campo	Elevada	Baixa	Campo	Elevada	Baixa
	CEa, mS m ⁻¹			Umidade, m ³ m ⁻³			SR, %		
Média	0,78	3,68	1,75	18,7	46,9	22,2	33,4	83,9	39,6
Mediana	0,66	3,37	1,45	18,8	47,0	21,9	33,4	83,4	41,1
Mínimo	0,23	1,98	0,21	15,2	41,4	13,5	28,1	80,5	25,9
Máximo	1,78	5,58	4,58	21,4	52,8	30,3	38,5	88,7	49,8
Amplitude	1,55	3,60	4,37	6,2	11,4	16,8	10,3	8,2	23,9
Q.Inferior	0,35	2,71	0,85	17,9	44,8	19,1	31,1	82,2	34,0
Q. Superior	1,26	4,79	2,17	20,2	49,6	25,2	36,4	85,4	44,3
Desvio Padrão	0,47	1,10	1,20	1,6	3,2	4,0	2,9	2,2	6,2
Assimetria	0,46	0,39	1,09	-0,5	0,0	-0,2	-0,1	0,5	-0,5
Curtose	-1,22	-1,20	0,42	-0,3	-0,8	-0,3	-1,1	-0,5	-0,5
CV (%)*	60,50	30,00	68,60	8,8	6,9	18,1	8,6	2,6	15,5
Número	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Prob.<W**	0,2476	0,2926	0,2537	0,1382	0,6035	0,9822	0,2476	0,2926	0,2537

*Coeficiente de Variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Tabela 15 – Resultados da análise estatística descritiva para os parâmetros levantados nas amostragens indeformadas no solo PVe em três condições de umidade

Momentos estatísticos	Condição de Umidade								
	Campo	Elevada	Baixa	Campo	Elevada	Baixa	Campo	Elevada	Baixa
	CEa, mS m ⁻¹			Umidade, m ³ m ⁻³			SR, %		
Média	4,76	6,14	2,10	24,8	37,8	11,2	54,6	82,7	24,5
Mediana	3,93	5,90	2,09	24,9	36,1	10,9	54,1	82,2	25,7
Mínimo	2,32	3,12	1,27	21,0	17,1	6,7	42,1	39,2	15,0
Máximo	8,88	12,38	3,23	30,3	65,1	19,7	67,1	123,6	37,4
Amplitude	6,56	9,26	1,96	9,2	48,0	13,1	25,1	84,5	22,4
Q.Inferior	2,96	3,89	1,69	21,5	34,8	8,6	48,4	80,9	19,3
Q. Superior	6,50	7,52	2,43	27,5	40,4	13,5	60,9	83,7	28,9
Desvio Padrão	1,98	2,30	0,49	2,9	7,3	3,1	6,7	11,4	5,7
Assimetria	0,59	0,80	0,28	0,1	1,2	0,6	0,0	-0,3	0,1
Curtose	-0,95	0,60	-0,39	-1,4	7,6	0,4	-1,0	12,8	-0,7
CV (%)*	41,60	37,40	23,50	11,9	19,4	27,7	12,3	13,8	23,2
Número	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Prob.<W**	0,4037	<0,0001	0,2973	0,0108	<0,0001	0,2346	0,4037	<0,0001	0,2973

*Coeficiente de Variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

As Tabelas 16 e 17 apresentam resultados da análise estatística descritiva para os três métodos de mensuração em cada solo, tomando-se todos os valores obtidos nas determinações, ou seja, no caso da amostragem na parede tomaram-se também os valores da

profundidade de 0,95 m e no caso da amostragem na superfície tomaram-se todas as distâncias entre eletrodos.

Tabela 16 – Resultados da análise estatística descritiva para CEa obtida nas mensurações realizadas para os solos LVd1 e LVd2 na unidade de campo

Momentos estatísticos	CEa, mS m ⁻¹					
	LVd1			LVd2		
	Indeformada	Parede	Superfície	Indeformada	Parede	Superfície
Média	1,93	1,99	2,43	0,23	0,38	0,54
Mediana	1,24	1,73	2,30	0,18	0,31	0,51
Mínimo	0,21	0,49	1,21	0,10	0,21	0,34
Máximo	6,01	5,88	5,11	1,10	0,82	0,92
Amplitude	5,80	5,39	3,90	1,00	0,61	0,58
Q.Inferior	0,78	1,02	1,71	0,15	0,26	0,48
Q. Superior	2,16	2,41	3,00	0,24	0,43	0,59
Desvio Padrão	1,78	1,30	0,90	0,18	0,17	0,10
Assimetria	1,4	1,3	0,9	4,0	1,3	1,2
Curtose	0,6	1,4	0,2	18,1	0,5	1,5
CV (%)*	92,3	65,3	37,1	80,0	45,8	18,4
Número	30	100	156	30	100	156
Prob.<W**	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

*Coeficiente de variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Tabela 17 – Resultados da análise estatística descritiva para CEa obtida nas mensurações realizadas para os solos LAd e PVe na unidade de campo

Momentos estatísticos	CEa, mS m ⁻¹					
	LAd			PVe		
	Indeformada	Parede	Superfície	Indeformada	Parede	Superfície
Média	0,78	1,16	1,54	4,76	5,04	3,97
Mediana	0,66	0,76	1,44	3,94	4,84	3,98
Mínimo	0,23	0,51	1,07	2,32	2,47	2,76
Máximo	1,78	2,45	2,29	8,88	9,46	4,99
Amplitude	1,55	1,94	1,22	6,56	6,99	2,23
Q.Inferior	0,36	0,63	1,29	2,96	3,04	3,54
Q. Superior	1,26	1,78	1,74	6,50	6,55	4,36
Desvio Padrão	0,47	0,63	0,31	1,98	1,99	0,52
Assimetria	0,5	0,6	0,8	0,6	0,4	0,0
Curtose	-1,2	-1,4	-0,4	-1,0	-1,2	-0,8
CV (%)*	60,4	54,0	20,3	41,6	39,5	13,0
Número	30	100	156	30	100	156
Prob.<W**	0,003	<0,0001	<0,0001	0,0122	<0,0001	0,0395

*Coeficiente de variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Para as Tabelas 18 e 19 foram tomadas apenas as determinações realizadas nas paredes que estavam nas mesmas profundidades em que amostras indeformadas foram tomadas e no caso das determinações em superfície adotou-se aquelas em que a profundidade máxima não

ultrapassasse aquela da amostra indeformada mais profunda. O cálculo para estabelecer a relação entre espaçamento e profundidade foi realizado a partir dos resultados obtidos neste trabalho.

Tabela 18 – Resultados da análise estatística descritiva para CEa obtida nas mensurações realizadas para os solos LVd1 e LVd2 na umidade de campo. Utilizaram-se apenas as amostras compatíveis com a profundidade de coleta das amostras indeformadas

Momentos estatísticos	CEa, mS m ⁻¹					
	LVd1			LVd2		
	Indeformada	Parede	Superfície	Indeformada	Parede	Superfície
Média	1,93	2,01	2,48	0,23	0,39	0,54
Mediana	1,24	1,70	2,38	0,18	0,33	0,51
Mínimo	0,21	0,49	1,24	0,10	0,22	0,34
Máximo	6,01	5,88	5,11	1,10	0,82	0,92
Amplitude	5,80	5,39	3,87	1,00	0,60	0,58
Q. Inferior	0,78	0,97	1,73	0,15	0,26	0,47
Q. Superior	2,16	2,54	3,02	0,24	0,46	0,60
Desvio Padrão	1,78	1,37	0,89	0,18	0,18	0,10
Assimetria	1,38	1,23	0,86	3,97	1,20	1,09
Curtose	0,58	0,94	0,19	18,08	0,11	1,17
CV (%)*	92,3	68	35,8	80,0	44,9	18,9
Número	30	90	150	30	90	144
Prob.<W**	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

*Coeficiente de variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

As diferenças entre os resultados das Tabelas 16 a 19 são pouco expressivas, porém é possível notar um pequeno aumento nos valores médios da CEa obtidos na superfície.

Nota-se a elevação do CV na medida em que o tamanho da amostra é reduzido. Segundo Corwin e Lesch (2003), a relação entre leituras de CEa obtidas através de mensuração em amostras pequenas com aquelas obtidas através de eletrodos na superfície nem sempre é clara, estando sujeita a desvios e erros. Os erros são consequência da diferença entre os volumes mensurados, devido a elevada variabilidade espacial de propriedades como porosidade, conteúdo de água e de sais.

Para a maior parte dos solos, os valores de CEa obtidos nas paredes apresentaram valores maiores que aqueles obtidos nas amostras indeformadas e na superfície.

Tabela 19 – Resultados da análise estatística descritiva para CEa obtida nas mensurações realizadas para os solos LAd e PVe na unidade de campo. Utilizaram-se apenas as amostras compatíveis com a profundidade de coleta das amostras indeformadas

Momentos estatísticos	CEa, mS m ⁻¹					
	LAd			PVe		
	Indeformada	Parede	Superfície	Indeformada	Parede	Superfície
Média	0,78	1,21	1,58	4,76	4,90	3,91
Mediana	0,66	0,91	1,52	3,94	4,26	3,89
Mínimo	0,23	0,51	1,07	2,32	2,47	2,76
Máximo	1,78	2,45	2,29	8,88	9,46	4,99
Amplitude	1,55	1,94	1,22	6,56	6,99	2,23
Q.Inferior	0,36	0,63	1,30	2,96	3,01	3,50
Q. Superior	1,26	1,86	1,83	6,50	6,46	4,35
Desvio Padrão	0,47	0,64	0,33	1,98	2,03	0,55
Assimetria	0,46	0,40	0,50	0,59	0,54	0,10
Curtose	-1,22	-1,52	-0,83	-0,96	-1,11	-0,82
CV (%)*	60,4	53,2	20,7	41,6	41,3	14
Número	30	90	126	30	90	108
Prob.<W**	0,003	<0,0001	<0,0001	0,0122	<0,0001	0,0366

*Coeficiente de variação, **Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Foram realizadas análises descritivas para as variáveis obtidas no estudo da variabilidade espacial. A estatística descritiva para a participação das frações argila e areia no solo são apresentadas nas Tabelas 20 e 21. A participação de argila aumentou em profundidade com valores médios oscilando entre 246 e 332 g kg⁻¹ para as camadas 0 a 0,2 e 0,6 a 0,8 m respectivamente, o comportamento oposto ocorreu para a areia com valores oscilando entre 735 e 646 g kg. As amplitudes nas participações de areia e argila dentro de uma mesma profundidade foram semelhantes quando se comparam as profundidades, embora os valores médios tenham oscilado. Os coeficientes de variação nas camadas que integram volumes de solo crescentes da superfície até a maior profundidade foram mais baixos que aqueles identificados nestas mesmas camadas no caso da CEa.

Tabela 20 – Resultados da análise estatística descritiva dos teores de argila no solo nas quatro profundidades de coleta das amostras

Momentos estatísticos	Camada de solo, m						
	0 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,6	0,6 a 0,8	0 a 0,4	0 a 0,6	0 a 0,8
Média (g kg ⁻¹)	246	280	311	332	263	279	292
Mediana (g kg ⁻¹)	233	276	301	326	251	268	282
Mínimo (g kg ⁻¹)	150	175	200	225	169	179	191
Máximo (g kg ⁻¹)	379	438	463	464	407	426	435
Amplitude (g kg ⁻¹)	229	263	263	239	238	246	244
Q. Inferior (g kg ⁻¹)	176	213	251	276	201	220	235
Q. Superior (g kg ⁻¹)	301	326	355	376	315	331	343
Desvio Padrão (g kg ⁻¹)	65	73	69	66	68	68	68
Assimetria	0,4	0,5	0,5	0,3	0,4	0,5	0,4
Curtose	-0,9	-0,8	-0,7	-1	-0,9	-0,8	-0,9
Coefficiente de Variação (%)	26,4	26,1	22,2	20,0	26,0	24,5	23,1
Número	90	90	90	90	90	90	90
Prob.<W*	0,0004	0,0003	0,0012	0,0007	0,0004	0,0005	0,0007

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Os valores de assimetria foram sempre positivos para a argila, com a distribuição deslocada para os menores valores, e negativos para a areia com distribuição deslocada para os maiores valores. Ambas as frações apresentaram distribuição platicúrtica. O teste de normalidade demonstrou que a distribuição não foi normal para as duas frações e em todas as camadas. A estatística descritiva para a fração silte demonstrou teor médio de 21 g kg⁻¹, oscilando entre 20 e 22 g kg⁻¹ para as camadas, os coeficientes de variação oscilaram entre 28,9 e 36,6%.

Tabela 21 – Resultados da análise estatística descritiva dos teores de areia no solo nas quatro profundidades de coleta das amostras

Momentos estatísticos	Camada de solo, m						
	0 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,6	0,6 a 0,8	0 a 0,4	0 a 0,6	0 a 0,8
Média (g kg ⁻¹)	735	699	668	646	717	701	687
Mediana (g kg ⁻¹)	745	712	674	654	726	708	696
Mínimo (g kg ⁻¹)	604	539	513	517	572	555	547
Máximo (g kg ⁻¹)	828	806	779	750	812	797	785
Amplitude (g kg ⁻¹)	224	267	266	233	240	242	239
Q. Inferior (g kg ⁻¹)	685	651	615	593	668	647	634
Q. Superior (g kg ⁻¹)	794	766	726	709	779	761	748
Desvio Padrão (g kg ⁻¹)	65	74	70	67	69	69	68
Assimetria	-0,4	-0,5	-0,5	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4
Curtose	-1,0	-0,7	-0,7	-1,1	-0,9	-0,8	-0,9
Coeficiente de Variação (%)	8,9	10,5	10,5	10,4	9,6	9,9	10
Número	90	90	90	90	90	90	90
Prob.<W*	0,0004	0,0003	0,001	0,0009	0,0003	0,0003	0,0004

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Nas Tabelas 22 e 23 são apresentados os resultados para a CEa. Os valores médios reduziram com o aumento da separação entre os eletrodos, tanto para a condição de solo com baixa umidade como na de solo úmido, com maiores valores médios para a condição de solo úmido em todos os valores de separação.

Os valores de CEa oscilaram desde 0,98 até 5,81 mS m⁻¹ considerando todas as distâncias de separação na condição de solo úmido, e entre 0,27 e 2,11 mS m⁻¹ para a condição de solo com baixa umidade.

O menor e maior valor para o solo úmido ocorreram na maior e na menor distância de separação respectivamente, ao passo que na condição de solo com baixa umidade os extremos ocorreram na menor distância de separação e na segunda menor distância, porém a observação dos valores dos quartis superior e inferior demonstra o mesmo comportamento dos valores médios, ou seja, maiores valores de CEa nas menores distâncias de separação e o oposto para as maiores. A razão entre os valores médios obtidos na separação de 0,19 m e 2,22 m foi de 2,5 para a condição úmida e de 1,8 para a condição de solo com baixa umidade, indicando maior variabilidade em profundidade na primeira condição.

Maiores dispersões dos valores ocorreram nas menores separações entre eletrodos e um comportamento oposto ao identificado na variabilidade vertical foi observado naquela horizontal, ou seja, para uma mesma separação entre eletrodos o coeficiente de variação foi sempre maior na condição de solo com baixa umidade

Tabela 22 – Resultados da análise estatística descritiva dos valores de CEa para a condição de solo úmido nas sete separações entre eletrodos

Momentos estatísticos	Separação entre eletrodos, m						
	0,19	0,32	0,57	0,95	1,33	1,59	2,22
Média (mS m ⁻¹)	3,43	3,13	2,56	1,98	1,68	1,55	1,36
Mediana (mS m ⁻¹)	3,25	3,04	2,50	1,94	1,66	1,55	1,32
Mínimo (mS m ⁻¹)	1,70	1,69	1,48	1,26	1,11	1,04	0,98
Máximo (mS m ⁻¹)	5,81	5,12	3,85	2,85	2,39	2,17	1,87
Amplitude (mS m ⁻¹)	4,11	3,43	2,37	1,59	1,28	1,13	0,89
Q. Inferior (mS m ⁻¹)	2,65	2,44	2,13	1,66	1,43	1,34	1,21
Q. Superior (mS m ⁻¹)	4,05	3,78	3,00	2,24	1,92	1,76	1,52
Desvio Padrão (mS m ⁻¹)	0,99	0,85	0,61	0,41	0,31	0,27	0,20
Assimetria	0,46	0,36	0,20	0,23	0,28	0,27	0,43
Curtose	-0,65	-0,71	-0,75	-0,69	-0,65	-0,70	-0,50
Coeficiente de Variação (%)	28,9	27,1	23,8	20,5	18,3	17,1	14,7
Número	90	90	90	90	90	90	90
Prob.<W*	0,0117	0,039	0,1186	0,0841	0,1282	0,149	0,0526

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

O teste de normalidade demonstrou que com exceção das separações de 0,57, 1,33 e 1,59 m na condição de solo úmido e de 0,95 m para a condição de solo com baixa umidade, a distribuição de frequência dos valores não segue uma distribuição normal, havendo, entretanto proximidade entre os valores da média e mediana em ambas as condições de umidade. Os valores de assimetria e curtose foram semelhantes entre as distâncias de separação para a condição de solo úmido com distribuição assimétrica deslocada para os menores valores e platicurticas, com maior dispersão de valores.

Na condição de solo seco houve oscilação nos valores entre as distâncias de separação, com distribuições achatadas para as maiores distância de separação dos eletrodos e afiladas para as menores. As distribuições estiveram sempre deslocadas para valores menores, com maior intensidade nas separações de 0,19 e 0,57 m.

Tabela 23 – Resultados da análise estatística descritiva dos valores de CEa para a condição de solo com baixa umidade nas sete separações entre eletrodos

Momentos estatísticos	Separação entre eletrodos, m						
	0,19	0,32	0,57	0,95	1,33	1,59	2,22
Média (mS m ⁻¹)	0,94	0,89	0,76	0,63	0,58	0,55	0,52
Mediana (mS m ⁻¹)	0,90	0,81	0,74	0,62	0,55	0,54	0,51
Mínimo (mS m ⁻¹)	0,27	0,42	0,34	0,36	0,38	0,35	0,35
Máximo (mS m ⁻¹)	2,03	2,11	1,32	0,94	0,84	0,77	0,71
Amplitude (mS m ⁻¹)	1,76	1,69	0,98	0,58	0,46	0,42	0,36
Q.Inferior (mS m ⁻¹)	0,69	0,67	0,60	0,54	0,49	0,47	0,45
Q. Superior (mS m ⁻¹)	1,12	1,03	0,89	0,71	0,65	0,61	0,59
Desvio Padrão (mS m ⁻¹)	0,38	0,32	0,22	0,13	0,11	0,09	0,08
Assimetria	0,70	1,11	0,73	0,38	0,48	0,40	0,24
Curtose	0,53	1,41	0,15	-0,29	-0,40	-0,46	-0,95
Coeficiente de Variação (%)	40,7	36,4	28,7	20,2	18,3	17,2	15,9
Número	90	90	90	90	90	90	90
Prob.<W*	0,0107	<0,0001	0,0026	0,2076	0,0209	0,0414	0,0126

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Os resultados da análise descritiva para os valores de umidade gravimétrica do solo são apresentados nas Tabelas 24 e 25. As diferença entre os valores médios de umidade na condição de solo úmido e com baixa umidade foram de 4,6, 3,8, 3,9, 4,5, 4,2, 4,1 e 4,3% para as camadas 0 a 0,2, 0,2 a 0,4, 0,4 a 0,6, 0,6 a 0,8, 0 a 0,4, 0 a 0,6 e 0 a 0,8 m respectivamente, diferenças semelhantes, porém em níveis de umidade distintos. A umidade foi sempre maior nas camadas mais profundas para as duas condições. As amplitudes de umidade entre as amostras tomadas dentro de uma mesma camada foram também semelhantes para as duas condições de umidade, oscilando entre 5,3 e 7,4%. Os extremos de umidade para as duas condições foram o máximo de 17,2% na condição de solo úmido e camadas de 0,4 a 0,6 e 0,6 a 0,8 m e mínimo de 4,1% na condição de solo seco e camada de 0 a 0,2 m.

Tabela 24 – Resultados da análise estatística descritiva dos teores de umidade no solo nas quatro profundidades de coleta das amostras para a condição de solo úmido

Momentos estatísticos	Camada de solo, m						
	0 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,6	0,6 a 0,8	0 a 0,4	0 a 0,6	0 a 0,8
Média (g kg ⁻¹)	11,1	11,5	12,6	13,4	11,3	11,7	12,2
Mediana (g kg ⁻¹)	11,0	11,2	12,3	13,0	11,0	11,4	11,8
Mínimo (g kg ⁻¹)	7,9	8,5	10,2	10,8	8,4	9,0	9,4
Máximo (g kg ⁻¹)	14,4	15,1	17,2	17,2	14,3	15,1	15,6
Amplitude (g kg ⁻¹)	6,5	6,6	7,0	6,4	5,9	6,1	6,2
Q. Inferior (g kg ⁻¹)	9,9	10,3	11,3	12,3	10,1	10,5	10,9
Q. Superior (g kg ⁻¹)	12,4	12,5	13,4	14,4	12,6	12,8	13,2
L. Inferior (g kg ⁻¹)*	7,3	8,2	9,4	10,2	7,6	8,2	8,7
L. Superior (g kg ⁻¹)*	14,9	14,8	15,8	16,6	15,0	15,3	15,6
Desvio Padrão (g kg ⁻¹)	1,5	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5
Assimetria	0,0	0,6	0,8	0,6	0,3	0,4	0,5
Curtose	-0,9	-0,6	0,1	-0,5	-0,9	-0,7	-0,7
Coeficiente de Variação (%)	13,4	13,7	13,0	11,3	13,2	12,9	12,4
Número	90	90	90	90	90	90	90
Prob.<W*	0,1383	0,0010	0,0002	0,0030	0,0198	0,0068	0,0047

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Do mesmo modo que para as outras variáveis a distribuição de frequência dos valores de umidade não foi normal. Este fato não constitui surpresa dado que a área selecionada para o trabalho apresentava um nítido gradiente em granulometria do solo. As assimetrias para umidade foram sempre positivas indicando uma distribuição deslocada para os menores valores. Com relação à dispersão, a distribuição foi mais achatada que a normal. Os coeficientes de variação dos teores de umidade foram mais altos para a condição de solo com baixa umidade, com valores decrescentes em função do aumento da profundidade e volume de solo considerado. Na condição de solo úmido os coeficientes de variação foram semelhantes entre as camadas e volumes de solo.

Tabela 25 – Resultados da análise estatística descritiva dos teores de umidade no solo nas quatro profundidades de coleta das amostras para a condição de solo com baixa umidade

Momentos estatísticos	Camada de solo, m						
	0 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,6	0,6 a 0,8	0 a 0,4	0 a 0,6	0 a 0,8
Média (g kg ⁻¹)	6,5	7,7	8,7	8,9	7,1	7,6	7,9
Mediana (g kg ⁻¹)	6,2	7,3	8,5	8,9	6,9	7,6	7,9
Mínimo (g kg ⁻¹)	4,1	4,8	5,3	4,9	4,5	5,1	5,5
Máximo (g kg ⁻¹)	10,2	10,8	11,8	12,3	10,2	10,5	10,8
Amplitude (g kg ⁻¹)	6,1	6,0	6,5	7,4	5,7	5,4	5,3
Q.Inferior (g kg ⁻¹)	5,2	6,3	7,3	7,3	5,6	6,2	6,4
Q. Superior (g kg ⁻¹)	7,7	8,9	9,9	10,1	8,3	8,7	9
Desvio Padrão (g kg ⁻¹)	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
Assimetria	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Curtose	-0,8	-1,1	-1,2	-0,8	-1	-1,2	-1,2
Coeficiente de Variação (%)	23,5	20,2	18,3	18,3	21,4	20,1	19,4
Número	90	90	90	90	90	90	90
Prob.<W*	0,0032	0,0012	0,0013	0,0181	0,0011	0,0005	0,0004

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk

Entre os dados levantados na malha identificaram-se valores considerados discrepantes, segundo o procedimento proposto por Tukey (1977), em que se estabelecem limites superior e inferior da distribuição das variáveis a partir da soma e subtração de 1,5 vezes a amplitude interquartílica à média amostral. Valores fora dos limites foram identificados para a CEa nos espaçamentos entre eletrodos de 0,19 e 0,32 m, na determinação em condição de solo úmido e nos espaçamentos 0,19, 0,32, 0,57, 0,95, 1,33 e 1,59 m na condição de solo seco. Entre os resultados analíticos de granulometria foram identificados valores fora dos limites apenas na fração silte, nas camadas 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m e 0,4 a 0,6 m. Para a umidade gravimétrica na condição de solo úmido houve valores fora dos limites nas profundidades de 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m e 0,6 a 0,8 m. Para aquelas variáveis em que foram identificados valores discrepantes realizou-se uma análise exploratória através da plotagem dos pontos em mapas para averiguar a ocorrência de estrutura espacial. Após a avaliação visual, constatou-se que com exceção de duas ocorrências para a variável silte na camada 0,40 a 0,60 m e para uma ocorrência na CEa mensurada na condição de solo seco e separação dos eletrodos de 0,32 m, todas as demais estavam localizadas em regiões bem definidas, apresentando estrutura espacial, não justificando a remoção.

4.2 Relação entre variáveis mensuradas nas trincheiras

4.2.1 Análise de variância dos parâmetros obtidos nas amostras indeformadas

A análise de variância demonstrou a ocorrência de efeito do tipo de solo e da profundidade de amostragem para todas as variáveis analisadas, com exceção do silte que não apresentou diferença em função da profundidade para os solos LVd2, LAd e PVe. As médias de Ds do LVd2 estiveram sempre no grupo com maiores valores, e entre as profundidades, com exceção do PVe, que apresentou maiores densidades nas maiores profundidades, os demais apresentaram maiores valores nas superiores. Ocorrendo comportamento semelhante para a RP, em que, entretanto o PVe também apresentou valores mais altos na menor profundidade. Os Latossolos apresentaram PT aumentando em profundidade enquanto o Argissolo apresentou redução em profundidade.

Tabela 26 – Resultados da análise de variância e do teste de comparação de médias para as variáveis densidade do solo (Ds), porosidade total (PT) e resistência à penetração (RP), em função da profundidade e solo

Profundidade, m	Ds, Mg m ⁻³				p-valor**
	LVd1	LVd2	LAd	PEve	
0,05	1,17 ab B*	1,49 bc A	1,25 a B	1,25 c B	<0,0001
0,25	1,22 a C	1,57 a A	1,26 a C	1,41 b B	<0,0001
0,45	1,12 bc C	1,53 ab A	1,16 b B	1,50 a A	<0,0001
0,65	1,04 cd B	1,49 bc A	1,08 c B	1,55 a A	<0,0001
0,85	1,02 d B	1,46 c A	1,01 d B	1,47 ab A	<0,0001
p-valor**	<0,0001	0,0005	<0,0001	<0,0001	

Profundidade, m	PT, m ³ m ⁻³				p-valor**
	LVd1	LVd2	LAd	PEve	
0,05	54,6 c A	43,6 ab B	52,1 d A	51,1 a A	<0,0001
0,25	54,3 c A	41,0 c C	51,6 d A	46,3 b B	<0,0001
0,45	58,5 b A	42,6 bc C	55,8 c B	43,2 bc C	<0,0001
0,65	61,2 ab A	44,1 ab C	58,8 b B	41,9 c C	<0,0001
0,85	62,3 a A	45,4 a B	61,6 a A	45,1 b B	<0,0001
p-valor	<0,0001	0,0002	<0,0001	<0,0001	

Profundidade, m	RP, Mpa				p-valor**
	LVd1	LVd2	LAd	PEve	
0,05	2,20 a A	0,51 c C	1,55 a B	1,42 a B	<0,0001
0,25	1,87 a A	0,97 a C	1,53 a AB	1,15 ab BC	0,0005
0,45	1,09 b A	0,80 ab B	0,89 b AB	0,93 b AB	0,0072
0,65	0,76 b B	0,66 bc B	0,66 b B	1,23 ab A	<0,0001
0,85	0,65 b B	0,57 c B	0,55 b B	0,91 b A	0,0014
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0015	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas na linha não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de prob. de erro, ** Prob. de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

Embora as frações granulométricas tenham ocupado quatro grupos estatísticos distintos entre os solos para todas as profundidades, dentro de cada solo a variação foi menor, com dois ou três grupos estatísticos conforme apresentado na Tabela 27, havendo um comportamento um pouco distinto no caso do LVd2. Apesar da menor variação, houve diferença significativa no teor de argila em função da profundidade em todos os solos, com maiores valores nas maiores profundidades.

Tabela 27 – Resultados da análise de variância e do teste de comparação de médias para as participações das frações argila, silte e areia, em função da profundidade e solo

Profundidade, m	Argila, g kg ⁻¹				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	739 b A*	94 c D	438 c B	226 b C	<0,0001
0,25	796 a A	125 b D	489 b B	251 b C	<0,0001
0,45	793 a A	135 b D	559 a B	257 b C	<0,0001
0,65	802 a A	150 a D	551 a B	336 a C	<0,0001
0,85	795 a A	138 ab D	557 a B	376 a C	<0,0001
p-valor**	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

Profundidade, m	Silte, g kg ⁻¹				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	68 a B	18 a C	25 a C	203 a A	<0,0001
0,25	23 b B	15 a B	28 a B	154 a A	<0,0001
0,45	31 b B	21 a B	23 a B	169 a A	<0,0001
0,65	25 b B	19 a B	21 a B	176 a A	<0,0001
0,85	20 b B	17 a B	16 a B	172 a A	<0,0001
p-valor	<0,0001	0,2796	0,6867	0,1267	

Profundidade, m	Areia, g kg ⁻¹				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	193 a D	888 a A	536 a C	571 a B	<0,0001
0,25	181 ab D	860 b A	483 b C	595 a B	<0,0001
0,45	176 b D	844 c A	418 c C	574 a B	<0,0001
0,65	173 b D	831 d A	428 c C	487 b B	<0,0001
0,85	184 ab C	845 c A	426 c B	452 c B	<0,0001
p-valor	0,0141	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas na linha não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro, ** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

Para a areia o comportamento foi oposto, com redução do teor em função da elevação da profundidade. Maiores valores do teor de silte foram identificados para o PVe em todas as profundidades. Nos outros solos não houve diferença significativa, com exceção da menor profundidade do LVd1.

O espaço poroso dos solos apresentou diferenças significativas para todos os solos e profundidades, com exceção do volume ocupado por poros de maior diâmetro na menor

profundidade. Este fato talvez esteja relacionado à constante mobilização desta camada nas operações agrícolas, que reduzem a presença desta fração, cujos valores se elevaram em profundidade, com exceção do PVe.

Tabela 28 – Resultados da análise de variância e do teste de comparação de médias para as variáveis relacionadas ao espaço poroso do solo, em função da profundidade e solo

Profundidade, m	Microporosidade, m ³ m ⁻³				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	37,3 a A*	20,2 a C	32,1 a B	31,8 a B	<0,0001
0,25	36,3 a A	19,0 b D	27,4 b B	23,0 c C	<0,0001
0,45	35,1 ab A	17,8 c D	27,4 b B	20,7 d C	<0,0001
0,65	33,5 bc A	17,3 c D	27,8 b B	25,0 c C	<0,0001
0,85	31,6 c A	16,9 c C	27,0 b B	28,0 b B	<0,0001
p-valor**	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

Profundidade, m	Macroporosidade, m ³ m ⁻³				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	15,0 d B	21,5 c A	16,9 d B	17,9 a AB	0,0015
0,25	15,8 cd C	18,2 d BC	22,2 c A	19,4 a B	<0,0001
0,45	20,3 bc BC	22,2 bc B	28,0 b A	18,8 a C	<0,0001
0,65	23,9 ab B	24,1 ab B	29,4 ab A	13,9 b C	<0,0001
0,85	27,9 a AB	25,5 a B	31,9 a A	14,1 b C	<0,0001
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

Profundidade, m	Poros > 0,1 mm, % da PT				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	20,9 d	23,9 b	24,8 c	23,2 b	0,3465
0,25	23,5 cd B	23,9 b B	33,5 b A	36,5 a A	<0,0001
0,45	28,8 bc C	32,8 a B	37,4 ab A	39,5 a A	<0,0001
0,65	31,8 ab BC	34,5 a AB	37,7 ab A	29,2 b C	0,0014
0,85	36,3 a A	34,8 a A	40,0 a A	26,6 b A	<0,0001
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas na linha não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro,** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

Para a microporosidade ocorreu o oposto, com redução dos valores em profundidade para todos os solos, havendo, entretanto alguma variação no caso do PVe. O comportamento das médias para as frações do volume de poros com diâmetros maiores, ou seja > 0,1 mm e entre 0,05 e 0,1 mm acompanhou aquele da macroporosidade e, de modo semelhante aqueles de menor diâmetro, 0,03 a 0,05 mm e >0,03 mm acompanham aquele da microporosidade.

Tabela 29 – Resultados da análise de variância e do teste de comparação de médias para as variáveis relacionadas ao espaço poroso do solo, em função da profundidade e solo

Profundidade, m	Poros entre 0,05 e 0,1 mm, % da PT				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	8,0 b C*	27,6 a A	9,6 c BC	12,8 a B	<0,0001
0,25	6,7 b C	25,1 ab A	11,2 bc B	9,1 b B	<0,0001
0,45	7,8 b C	22,6 b A	13,1 ab B	7,9 bc C	<0,0001
0,65	9,8 a C	23,8 b A	13,6 a B	6,4 d D	<0,0001
0,85	10,5 a C	25,3 ab A	14,1 a B	6,8 cd D	<0,0001
p-valor**	<0,0001	0,0072	<0,0001	<0,0001	

Profundidade, m	Poros entre 0,03 e 0,05 mm, % da PT				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	4,0 a C	20,4 a A	8,3 a B	7,5 a B	<0,0001
0,25	4,5 a C	12,7 b A	6,6 b B	6,2 ab BC	<0,0001
0,45	5,1 a B	13,0 b A	6,4 b B	5,0 bc B	<0,0001
0,65	5,2 a C	11,7 b A	7,0 ab B	4,2 c C	<0,0001
0,85	4,4 a C	12,2 b A	6,7 ab B	4,8 c C	<0,0001
p-valor	0,1275	<0,0001	0,0149	<0,0001	

Profundidade, m	Poros < 0,03 mm, % da PT				
	LVd1	LVd2	LAd	PVe	p-valor**
0,05	67,1 a A	28,2 b C	57,3 a B	56,5 a B	<0,0001
0,25	65,3 a A	38,4 a C	48,7 b B	48,2 b B	<0,0001
0,45	58,4 b A	31,6 b D	43,1 c C	47,5 b B	<0,0001
0,65	53,2 bc B	30,1 b D	41,7 c C	60,2 a A	<0,0001
0,85	48,8 c B	27,8 b D	39,1 c C	61,9 a A	<0,0001
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas na linha não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro,** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

As médias de CEa apresentaram valores menores com o aumento da profundidade para todos os solos e condições de umidade com exceção do PVe, em que ocorre elevação na profundidade de 0,65 m, coincidente com maiores teores de argila e percentual de poros menores que 0,03 mm. Para todos os solos e profundidades as médias de CEa, umidade volumétrica e SR foram estatisticamente superiores na condição com maior umidade. A redução da CEa em função da menor umidade tendeu a ser mais expressiva nas maiores profundidades que nas superiores. Isto pode ser causado pela menor presença de filmes de água nesta profundidade para a passagem da corrente elétrica quando comparada com a camada superior. Este aspecto pode ser corroborado pela menor presença de microporos em profundidade, que facilitam a formação de filmes contínuos de água que estão mais relacionados à estrutura do solo que à sua porosidade.

Tabela 30 – Resultados da análise de variância e do teste de comparação de médias para as variáveis CEa, umidade e saturação relativa (SR), em função da profundidade e condição de umidade nos solos LVd1 e LVd2

Profundidade, m	LVd1			LVd2		
	CEa, mS m ⁻¹		p-valor	CEa, mS m ⁻¹		p-valor
	Elevada	Baixa		Elevada	Baixa	
0,05	9,24 a A*	3,37 a B	0,0501	4,46 A	0,97 a B	0,0005
0,25	3,30 b A	0,63 b B	<0,0001	1,29 A	0,20 b B	<0,0001
0,45	2,30 bc A	0,45 b B	0,0005	1,85 A	0,13 b B	<0,0001
0,65	1,12 c A	0,26 b B	0,0012	2,54 A	0,12 b B	<0,0001
0,85	2,43 bc A	0,82 b B	<0,0001	2,16 A	0,12 b B	0,0009
p-valor	<0,0001	<0,0001		0,0585	0,2615	
Profundidade, m	Umidade, m ³ m ⁻³		p-valor	Umidade, m ³ m ⁻³		p-valor
	Elevada	Baixa		Elevada	Baixa	
0,05	49,6 a A	23,8 B	<0,0001	39,2 a A	7,2 B	<0,0001
0,25	45,7 c A	20,5 B	<0,0001	33,9 c A	6,1 B	<0,0001
0,45	46,7 bc A	21,0 B	<0,0001	34,5 bc A	6,3 B	<0,0001
0,65	48,6 ab A	21,3 B	<0,0001	35,3 bc A	5,7 B	<0,0001
0,85	50,2 a A	23,6 B	<0,0001	36,4 b A	5,7 B	0,0008
p-valor	<0,0001	0,0660		<0,0001	0,4507	
Profundidade, m	SR, %		p-valor	SR, %		p-valor
	Elevada	Baixa		Elevada	Baixa	
0,05	90,9 a A	43,6 a B	<0,0001	90,0 a A	16,4 B	<0,0001
0,25	84,2 b A	37,8 ab B	<0,0001	82,6 b A	14,8 B	<0,0001
0,45	79,9 c A	36,0 b B	<0,0001	80,8 b A	14,9 B	<0,0001
0,65	79,4 c A	34,8 b B	<0,0001	80,0 b A	13,0 B	<0,0001
0,85	80,5 bc A	37,8 ab B	<0,0001	80,0 b A	12,4 B	0,0005
p-valor	<0,0001	0,0038		<0,0001	0,3089	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro. Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Welch, a 5% de probabilidade de erro. ** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

Os valores de CEa na menor profundidade diferiram significativamente daquele da camada imediatamente inferior, com maior intensidade que aquela observada entre as outras profundidades. Este comportamento deve ser explicado não apenas pela maior umidade presente, mas também pela maior concentração de íons na solução do solo nesta profundidade.

Tabela 31 – Resultados da análise de variância e do teste de comparação de médias para as variáveis CEa, Umidade e saturação relativa (SR), em função da profundidade e condição de umidade nos solos LAd e PVe

Profundidade, m	LAd			PVe		
	CEa, mS m ⁻¹		p-valor	CEa, mS m ⁻¹		p-valor
	Elevada	Baixa		Elevada	Baixa	
0,05	5,31 a A*	3,62 a B	0,0094	8,16 a A	1,81 b B	0,0004
0,25	4,04 b A	1,64 b B	0,0004	3,49 b A	1,72 b B	<0,0001
0,45	3,06 bc A	0,70 b B	<0,0001	4,44 b A	2,06 b B	0,0071
0,65	3,21 bc A	1,42 b B	0,0001	7,29 a A	2,72 a B	0,0152
0,85	2,78 c A	1,38 b B	0,0006	7,34 a A	2,17 ab B	<0,0001
p-valor	<0,0001	<0,0001		<0,0001	0,0007	

Profundidade, m	Umidade, m ³ m ⁻³			Umidade, m ³ m ⁻³		
0,05	45,2 ab A	22,1 abc B	<0,0001	47,9 a A	15,2 a B	<0,0001
0,25	43,1 d A	19,8 bc B	<0,0001	37,7 b A	9,1 c B	<0,0001
0,45	46,3 cd A	18,6 c B	<0,0001	34,8 b A	8,0 c B	<0,0001
0,65	49,0 bc A	24,8 ab B	<0,0001	34,5 b A	11,0 bc B	<0,0001
0,85	51,1 a A	25,8 a B	<0,0001	34,2 b A	12,8 ab B	<0,0001
p-valor	<0,0001	0,0018		0,0011	<0,0001	

Profundidade, m	SR, %			SR, %		
0,05	42,4 a A	86,8 a B	<0,0001	93,6 A	29,7 a B	<0,0001
0,25	38,3 a A	83,4 b B	<0,0001	81,4 A	19,5 b B	<0,0001
0,45	33,4 a A	82,9 b B	<0,0001	80,6 A	18,5 b B	<0,0001
0,65	42,2 a A	83,4 b B	<0,0001	82,4 A	26,2 a B	<0,0001
0,85	42,0 a A	82,9 b B	<0,0001	75,6 A	28,4 a B	<0,0001
p-valor	0,0397	0,0026		0,0817	<0,0001	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro. Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Welch, a 5% de probabilidade de erro. ** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

Na comparação das médias de CEa, umidade volumétrica e SR em função da profundidade para cada tipo de solo, apresentas nas Tabelas 32 e 33, para as condições de umidade elevada e de baixa umidade, notou-se menor diferença entre as medias para a maior profundidade.

Na condição de umidade elevada a maior amplitude com médias significativamente diferentes de CEa ocorreu na camada 0,65 m, contribuindo para isto os valores elevados do PVe. Na camada de 0,85 m a média do PVe foi a única a diferir significativamente, estando as demais em um mesmo grupo estatístico. Entre as profundidades elevadas o PVe sempre esteve no grupo estatístico com os maiores valores. Sendo o oposto válido para o LVd2, ou seja, sempre apresentando valores mais baixos.

Tabela 32 – Resultados da análise de variância e do teste de comparação de médias para as variáveis CEa, Umidade e saturação relativa (SR), em função da profundidade e tipo de solo na condição de umidade elevada

Solo	Profundidade, m				
	CEa, mS m ⁻¹				
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
LVd1	9,2 a*	3,3 a	2,3 b	1,1 c	2,6 b
LVd2	4,5 b	1,3 b	1,9 b	2,5 bc	2,2 b
LAd	5,3 ab	4,0 a	3,1 b	3,2 b	2,8 b
PVe	8,2 ab	3,5 a	4,4 a	7,3 a	7,3 a
p-valor**	0,0075	<0,0001	0,0006	<0,0001	0,001
Solo	Umidade, m ³ m ⁻³				
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
LVd1	49,6 a	45,7 a	46,7 a	48,6 a	50,2 a
LVd2	39,2 b	33,9 c	34,5 b	35,3 b	36,4 b
LAd	45,2 ab	43,1 a	46,3 a	49,0 a	51,1 a
PVe	47,9 a	37,7 b	34,8 b	34,5 b	34,2 b
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Solo	SR, %				
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
LVd1	90,9	84,2	79,9 b	79,4 b	80,7
LVd2	90,0	82,6	80,8 ab	80,0 b	80,0
LAd	86,8	83,4	82,9 a	83,4 a	82,9
PVe	93,6	81,4	80,6 ab	82,4 a	75,6
p-valor	0,1263	0,0885	0,0186	<0,0001	0,2554

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro. ** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

Para a variável SR, na condição de umidade elevada não houve diferença entre os solos para as profundidades 0,05, 0,25 e 0,85 m. Mesmo não havendo diferenças na SR os resultados demonstram haver diferenças significativas para os valores de CEa e umidade volumétrica entre os solos em todas as profundidades. O fato de não haver diferença nos valores de SR, mas haver naqueles de CEa demonstra a importância de outros fatores não apenas relacionados à estrutura do solo na determinação da CEa.

Os valores da CEa são determinados por uma combinação de parâmetros físico-químicos dos solos. Os resultados apresentados apontam com maior frequência para aqueles que determinam a passagem da corrente por meio do espaço poroso quando este é mais favorável à formação de caminhos contínuos de água.

Tabela 33 – Resultados da análise de variância e do teste de comparação de médias para as variáveis CEa, Umidade e saturação relativa (SR), em função da profundidade e tipo de solo na condição de umidade baixa

Solo	Profundidade, m				
	CEa, mS m ⁻¹				
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
LVd1	3,37 a*	0,63 b	0,45 bc	0,26 c	0,82 c
LVd2	0,97 b	0,20 b	0,13 c	0,12 c	0,12 d
LAd	3,62 a	1,64 a	0,70 b	1,42 b	1,38 b
PVe	1,81 b	1,72 a	2,06 a	2,72 a	2,17 a
p-valor	0,0031	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Solo	Umidade, m ³ m ⁻³				
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
LVd1	23,8 a	20,5 a	21,0 a	21,3 b	23,6 a
LVd2	7,2 c	6,1 b	6,3 b	5,7 d	5,7 c
LAd	22,1 a	19,8 a	18,6 a	24,8 a	25,8 a
PVe	15,2 b	9,1 b	8,0 b	11,0 c	12,8 b
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Solo	SR, %				
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85
LVd1	43,6 a	37,8 a	36,0 a	34,8 b	37,8 a
LVd2	16,4 c	14,8 b	14,9 b	13,0 d	12,4 c
LAd	42,4 a	38,3 a	33,4 a	42,2 a	42,0 a
PVe	29,7 b	19,5 b	18,5 b	26,2 c	28,4 b
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro. ** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

Na Tabela 34 é apresentada a análise de variância para verificar o efeito do método sobre os valores médios obtidos para a CEa e demonstrou haver diferença nos valores médios obtidos no LVd2 e LAd, solos onde os valores médios foram mais baixos, conforme apresentado na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultado da análise de variância para os valores de CEa obtidos através das amostras indeformadas e das mensurações nas paredes das trincheiras

Solo	CEa, mS m ⁻¹		p-valor
	Amostras Indeformadas	Parede trincheiras	
LVd1	1,94	2,20	0,0755
LVd2	0,25 b	0,38 a	0,0112
LAd	0,82 b	1,18 a	<0,0001
PVe	4,73	4,87	0,5990

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro

A análise de correlação de Pearson, entre os métodos, para os solos LVd1, LVd2, LAd e PVe apresentou coeficientes de 0,93, 0,55, 0,93 e 0,95, respectivamente. Todos eles significativos. Estes resultados e os altos valores de CV para as mensurações da CEa em

amostras indeformadas, com baixa umidade, demonstram a limitação do método nesta condição, devendo ser dada prioridade para determinações em maiores umidades.

Para as mensurações realizadas com os eletrodos nas paredes das trincheiras foram analisados os efeitos do tipo de solo e da profundidade sobre os valores de CEa, conforme apresentado na Tabela 35. Para as profundidades 0,05, 0,25 e 0,35 foram obtidos quatro grupos no teste de comparação de médias, ou seja, foi possível separar os quatro solos sem haver, entretanto um comportamento definido quanto aos grupos estatísticos nestas profundidades. As diferenças em profundidade foram, por outro lado, mais acentuadas, com maior número de grupos estatísticos.

Tabela 35 – Resultado da análise de variância para os valores de CEa dos quatro solos, obtidos nas paredes das trincheiras

Profundidade, m	CEa, mS m ⁻¹							
	LVd1		LVd2		LAd		PVe	**p-valor
0,05	5,05 a	A	0,54 b	D	1,80 b	C	2,84 f	B <0,0001
0,15	3,19 b	A	0,77 a	C	2,20 a	B	3,01 f	A <0,0001
0,25	2,28 c	B	0,50 b	D	1,97 b	C	3,07 f	A <0,0001
0,35	2,11 cd	B	0,33 c	D	1,50 c	C	3,43 f	A <0,0001
0,45	1,36 ef	B	0,29 c	C	0,92 d	B	4,13 e	A <0,0001
0,55	0,62 g	B	0,30 c	B	0,66 e	B	5,58 d	A <0,0001
0,65	0,66 g	B	0,30 c	B	0,58 e	B	7,04 b	A <0,0001
0,75	1,16 f	B	0,28 c	C	0,61 e	BC	7,74 a	A <0,0001
0,85	1,65 e	B	0,25 c	C	0,64 e	C	7,29 ab	A <0,0001
0,95	1,79 de	B	0,25 c	C	0,72 de	C	6,26 c	A <0,0001
p-valor	<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro. ** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F

Para as mensurações realizadas em superfície o número de distâncias de separação dos eletrodos foi de 24. A análise de variância permitiu distinguir os solos quanto à sua CEa para a grande maioria das distâncias de separação. A variação da CEa em profundidade foi caracterizada pela presença de diversos grupos estatísticos obtidos no teste de comparação de médias, conforme apresentado na Tabela 36. As transições entre as médias são menos abruptas quando em comparação ao observado nas determinações nas paredes das trincheiras. Este efeito é esperado em função do método, que engloba volumes subsequentemente crescentes de solo na medida em que os eletrodos são afastados.

Tabela 36 – Resultado da análise de variância para os valores de CEa dos quatro solos, obtidos na superfície

Espaçamento Eletrodos, m	CEa, mS m ⁻¹							
	LVd1		LVd2		LAd		PVe	**p- valor
0,10	4,26 ab	A	0,51 abcde	D	1,85 abcd	C	3,02 k	B <0,0001
0,11	4,45 a	A	0,64 ab	D	2,14 a	C	3,43 ijk	B <0,0001
0,16	3,74 bc	A	0,59 abcde	C	2,00 ab	B	3,26 jk	A <0,0001
0,19	3,50 cd	A	0,65 a	C	1,89 abc	B	3,41 ijk	A <0,0001
0,26	3,16 def	A	0,61 abcde	C	1,87 abcd	B	3,49 hijk	A <0,0001
0,29	3,06 def	B	0,63 abc	D	2,00 ab	C	3,62 ghij	A <0,0001
0,34	3,04 def	B	0,63 abc	D	1,78 bcde	C	3,68 fghij	A <0,0001
0,41	2,88 efg	B	0,61 abcd	D	1,73 bcdef	C	3,80 efghij	A <0,0001
0,48	2,62 fg	B	0,53 abcde	D	1,59 defg	C	3,87 efghij	A <0,0001
0,49	2,66 efg	B	0,61 abcde	D	1,58 cdefgh	C	4,04 cdefgh	A <0,0001
0,56	2,45 gh	B	0,58 abcde	D	1,47 efghi	C	4,07 bcdefg	A <0,0001
0,64	2,43 gh	B	0,61 abcd	D	1,42 fghi	C	4,26 abcde	A <0,0001
0,67	2,38 ghi	B	0,52 abcde	D	1,45 fghi	C	4,36 abcd	A <0,0001
0,79	2,11 hij	B	0,48 abcde	D	1,33 ghi	C	4,44 abcd	A <0,0001
0,86	2,03 hijk	B	0,49 abcde	D	1,32 ghi	C	4,55 abc	A <0,0001
1,05	1,87 ijkl	B	0,47 cde	D	1,30 hi	C	4,65 a	A <0,0001
1,11	1,80 jklm	B	0,46 de	D	1,26 hi	C	4,63 a	A <0,0001
1,24	1,75 jklmn	B	0,47 bcde	D	1,24 i	C	4,59 ab	A <0,0001
1,43	1,67 jklmn	B	0,47 e	D	1,23 i	C	4,40 abc	A <0,0001
1,62	1,60 jklmn	B	0,46 de	D	1,24 i	C	4,19 abcdef	A <0,0001
1,75	1,52 klmn	B	0,45 de	D	1,27 hi	C	4,13 abcdefg	A <0,0001
2,06	1,42 lmn	B	0,49 abcde	C	1,33 ghi	B	3,90 defghi	A <0,0001
2,38	1,32 mn	B	0,50 abcde	C	1,39 ghi	B	3,62 ghij	A <0,0001
2,70	1,25 n	C	0,54 abcde	D	1,47 efghi	B	3,43 ijk	A <0,0001
p-valor	<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro. ** Probabilidade de erro ao afirmar que há diferença entre os níveis, teste F.

4.2.2 Correlação entre os parâmetros obtidos nas amostras indeformadas

A análise de correlação corroborou os resultados identificados na análise descritiva e na análise de variância, demonstrando que as variáveis relacionadas ao espaço poroso apresentaram maior associação com a CEa que aqueles da constituição granulométrica do solo. Na Tabela 37 notou-se a as frações argila e areia apresentaram baixa correlação com a CEa quando se considera toda a amplitude de umidade, e que a própria umidade, a SR e o percentual de poros com menor diâmetro tiveram importante correlação positiva, apesar dos coeficientes de correlação situarem-se todos abaixo de 0,7. A macroporosidade e as frações de poros com maior diâmetro apresentaram sempre correlações negativas.

Tabela 37 – Resultados para a correlação de Pearson entre atributos do solo e a CEa

Atributos	r	p-valor
SR	0,6037	<0,0001
Umidade vol.	0,5375	<0,0001
Silte	0,4052	<0,0001
Poros < 0,03 mm*	0,3905	<0,0001
Macroporosidade	-0,3584	<0,0001
RP	0,3472	<0,0001
Poros entre 0,05 e 0,1 mm*	-0,3065	<0,0001
Poros > 0,1 mm*	-0,2526	0,0013
Microporosidade	0,231	0,0033
Poros entre 0,03 e 0,05 mm*	-0,2114	0,0073
Areia	-0,1181	0,1369
PT	-0,0741	0,3518
Ds	0,0411	0,6062
Argila	0,0051	0,9485

*Percentual da PT com poros de diâmetro equivalente no intervalo considerado

A presença de correlação com o silte pode entendida pela correlação entre esta variável e outras, como é o caso da maior presença de poros com menor diâmetro quando há mais silte.

A correlação realizada em separado para as duas condições de umidade é apresentada na Tabela 38 e demonstra haver algumas variáveis com mesmas relações positivas, casos da RP, percentual da porosidade com poros entre 0,03 e 0,05 e silte, e outras com relações negativas, como a macroporosidade e percentual da porosidade total com poros maiores que 0,1 mm. A baixa correlação entre a SR e a CEa no caso da condição de umidade elevada é explicada pela baixa variabilidade desta propriedade nesta condição, ocorrendo o oposto no caso em que a umidade do solo esteve baixa. Deve ser ressaltado o fato da PT não apresentar correlação em nenhuma condição de umidade, ao passo que a micro e a macroporosidade apresentaram correlações com a CEa opostas uma à outra em ambas as condições de umidade, demonstrando a importância em caracterizar as frações do espaço poroso para estabelecer sua relação com a CEa.

Tabela 38 – Resultados para a correlação de Pearson entre atributos dos solos e a CEa para as condições de umidade

Umidade Elevada			Umidade Baixa		
Atributos	r	p-valor	Atributos	r	p-valor
Silte	0,56	<0,0001	Poros entre 0,03 e 0,05 mm*	0,53	<0,0001
Macroporosidade	-0,49	<0,0001	SR	0,52	<0,0001
Poros entre 0,03 e 0,05 mm*	0,49	<0,0001	RP	0,49	<0,0001
RP	0,42	<0,0001	Poros entre 0,05 e 0,1 mm*	-0,47	<0,0001
Poros > 0,1 mm*	-0,36	0,0010	Silte	0,44	<0,0001
Poros entre 0,05 e 0,1 mm*	-0,35	0,0013	Macroporosidade	-0,40	0,0002
Microporosidade	0,27	0,0166	Umidade vol.	0,39	0,0004
Poros < 0,03 mm*	-0,24	0,0340	Microporosidade	0,36	0,0012
PT	-0,15	0,1961	Poros < 0,03 mm*	-0,34	0,0020
SR	0,14	0,2122	Poros > 0,1 mm*	-0,25	0,0276
Areia	-0,12	0,2702	Areia	-0,21	0,0660
Ds	0,11	0,3444	Argila	0,08	0,4714
Argila	-0,03	0,7932	Ds	-0,06	0,5989
Umidade vol.	-0,02	0,8448	PT	0,01	0,9278

*Percentual da PT com poros de diâmetro equivalente ao intervalo considerado

4.2.3 Regressão dos parâmetros levantados nas amostras indeformadas

Os atributos que apresentaram correlação significativa com a CEa foram utilizados para produzir regressões lineares. Três conjuntos de regressões foram obtidos, com base na condição de umidade.

As regressões apresentadas nas Tabelas 39 a 41 foram sempre significativas, porém com baixo coeficiente de determinação. Os resultados comprovam as observações realizadas por (FUKUE et al., 1999; BESSON et al., 2004; CORWIN; LESCH; FARAHANI, 2008) de que a associação da CEa com apenas uma propriedade do solo é difícil pois o fenômeno é determinado por uma série de fatores atuando conjuntamente.

Os resultados para os ajustes obtidos na amplitude total de variação da umidade do solo foram baixos sendo que a SR e a umidade volumétrica apresentaram comportamento um pouco superior, o que deve ser compreendido pela diferença nos níveis destas propriedades entre uma e outra condição.

Tabela 39 – Resultados da análise de regressão para propriedades que apresentaram correlação significativa com a CEa considerando a amplitude total de umidade do solo

Atributos	Modelo	R ²	p-valor
SR	$y = 32,03 + 11,53 \text{ CEa} - 1,18(\text{CEa}-2,66)^2$	0,36	<0,0001
Umidade vol.	$y = 17,14 + 5,65 \text{ CEa} - 0,62(\text{CEa}-2,66)^2$	0,29	<0,0001
Silte	$y = 26,72 + 15,85 \text{ CEa} - 1,20(\text{CEa}-2,66)^2$	0,16	<0,0001
Poros < 0,03 mm*	$y = 41,36 + 2,68 \text{ CEa} - 0,19(\text{CEa}-2,66)^2$	0,15	<0,0001
Macro-porosidade	$y = 23,62 - 0,78 \text{ CEa} - 0,01(\text{CEa}-2,66)^2$	0,13	<0,0001
RP	$y = 0,82 + 0,09 \text{ CEa} - 0,005(\text{CEa}-2,66)^2$	0,13	<0,0001
Poros entre 0,05 e 0,1 mm*	$y = 17,03 - 1,66 \text{ CEa} + 0,21(\text{CEa}-2,66)^2$	0,16	<0,0001
Poros > 0,1 mm*	$y = 32,37 - 0,22 \text{ CEa} - 0,14(\text{CEa}-2,66)^2$	0,10	0,0004
Micro-porosidade	$y = 24,78 + 0,86 \text{ CEa} - 0,06(\text{CEa}-2,66)^2$	0,06	0,0033
Poros entre 0,03 e 0,05 mm*	$y = 9,24 - 0,79 \text{ CEa} + 0,118(\text{CEa}-2,66)^2$	0,10	0,0073

*Percentual da PT com poros de diâmetro equivalente ao intervalo considerado

Na condição de solo com umidade elevada, a regressão para o silte apresentou maior coeficiente de determinação, devendo este resultado ser interpretado com precaução. Dentre os quatro solos avaliados apenas o PVe, que apresentou valores mais altos de CEa em boa parte o perfil, possuía valores de silte mais altos. Apesar da ocorrência de diferença estatística entre as profundidades para os valores de CEa neste solo, o mesmo não ocorreu para os teores de silte.

Tabela 40 – Resultados da análise de regressão para propriedades que apresentaram correlação significativa com a CEa na condição de umidade elevada

Atributos	Modelo	R ²	p-valor
Silte	$y = -11,50 + 21,79\text{CEa} - 2,15(\text{CEa}-3,98)^2$	0,38	<0,0001
Macroporosidade	$y = 25,74 - 1,08\text{CEa} - 0,000043(\text{CEa}-3,98)^2$	0,24	<0,0001
Poros entre 0,03 e 0,05 mm*	$y = 10,44 - 0,93\text{CEa} + 0,18(\text{CEa}-3,98)^2$	0,19	0,0003
RP	$y = 0,65 + 0,1\text{CEa} - 0,008(\text{CEa}-3,98)^2$	0,20	0,0002
Poros > 0,1 mm*	$y = 33,69 - 0,37\text{CEa} - 0,19(\text{CEa}-3,98)^2$	0,01	0,0003
Poros entre 0,05 e 0,1 mm*	$y = 19,59 - 1,92\text{CEa} + 0,29(\text{CEa}-3,98)^2$	0,24	<0,0001
Microporosidade	$y = 23,47 + 0,93\text{CEa} - 0,08(\text{CEa}-3,98)^2$	0,08	0,0384
Poros < 0,03 mm*	$y = 36,27 + 3,23 \text{ CEa} - 0,28(\text{CEa}-3,98)^2$	0,27	<0,0001

*Percentual da PT com poros de diâmetro equivalente ao intervalo considerado

As regressões para a condição de menor umidade apresentaram coeficientes de determinação mais altos que aqueles obtidos em toda a amplitude de umidade e para a condição de maior umidade, conforme demonstrado na Tabela 41.

Tabela 41 – Resultados da análise de regressão para propriedades que apresentaram correlação significativa com a CEa na condição de menor umidade

Atributos	Modelo	R ²	p-valor
Poros entre 0,03 e 0,05 mm*	$y = 9,46 - 2,01CEa + 0,71(CEa-1,33)^2$	0,20	0,0002
SR	$y = 22,33 + 5,63CEa - 0,45(CEa-1,33)^2$	0,27	0,0001
RP	$y = 0,77 + 0,16CEa + 0,03(CEa-1,33)^2$	0,25	0,0001
Poros entre 0,05 e 0,1 mm*	$y = 17,68 - 4,34CEa + 1,31(CEa-1,33)^2$	0,33	0,0001
Silte	$y = 27,09 + 45,78CEa - 18,16(CEa-1,33)^2$	0,41	0,0001
Macroporosidade	$y = 23,88 - 1,57CEa - 0,22(CEa-1,33)^2$	0,17	0,0009
Umidade vol.	$y = 12,12 + 2,66 CEa - 0,17(CEa-1,33)^2$	0,15	0,0017
Microporosidade	$y = 24,15 + 1,85CEa + 0,05(CEa-1,33)^2$	0,13	0,0053
Poros < 0,03 mm*	$y = 40,18 + 6,23CEa - 0,75 (CEa-1,33)^2$	0,29	0,0001
Poros > 0,1 mm*	$y = 32,67 + 0,11CEa - 1,26(CEa-1,33)^2$	0,17	0,0006

*Percentual da PT com poros de diâmetro equivalente ao intervalo considerado

4.3 Sondagem vertical e medidas no perfil

Os valores de CEa obtidos para os quatro solos através da sondagem elétrica vertical, realizada com o uso de distâncias crescentes de separação entre eletrodos, são apresentados na Figura 15, permitindo a comparação entre os solos quanto a esta propriedade. Os valores de CEa foram quase sempre mais altos na superfície, reduzindo em profundidade. No caso do PVe correu comportamento distinto dos demais, com presença de uma camada com maior condutividade em profundidade que está associada à ocorrência do gradiente textural típico desta classe de solos. Embora o teor de umidade para o levantamento em cada solo tenha oscilado, as determinações foram sempre realizadas em condições de estabilidade nos teores de umidade, ou seja, sem que houvesse ocorrido precipitação nos dias anteriores, de modo a permitir reduzir o efeito de eventos variáveis no tempo. A dispersão dos pontos apresentou formas que descreveram a presença de maior ou menor variabilidade entre os perfis de solo.

Figura 15 – Valores de CEa obtidos na superfície dos quatro solos em função das distintas distâncias de separação empregadas

Houve maior dispersão dos valores nas menores distâncias de separação dos eletrodos, podendo este aspecto ser atribuído não apenas à maior presença de variabilidade das propriedades dos solos nas camadas menos profundas, mas também ao menor volume de solo com influência sobre a medida. Os valores de CEa oscilaram em intervalo compatível com aqueles identificados na literatura para solos semelhantes aos avaliados, conforme sintetizado na Tabela 1.

As medidas tomadas nas paredes das trincheiras são apresentadas na Figura 16 e apresentam comportamento semelhante àquele obtido na sondagem vertical, porém com menor intensidade nas oscilações.

Figura 16 – Variação da CEA mensurada ao longo das paredes das trincheiras em a) LVd1, b) LVd2, c) LAd e d) PVe

Os valores de CEA obtidos nas paredes da trincheira foram utilizados como referência para avaliar aqueles gerados no método em superfície quanto à sua capacidade de representar a variabilidade da propriedade ao longo do perfil. As três relações entre distância de separação dos eletrodos e profundidade de prospecção foram comparadas a partir da regressão linear dos valores médios de CEA obtidos para cada solo nas paredes e em superfície para as profundidades de 0,05, 0,25, 0,45, 0,65 e 0,85 m. Para a sondagem vertical as profundidades foram calculadas pelas relações $Z_e = 3 \cdot a \cdot 0,175$, $Z^* = 3 \cdot a \cdot 0,105$ e $Z = R_w$ (90%). Os resultados apresentados na Tabela 40 demonstram não haver uma relação que satisfaça os distintos tipos de solos.

Tabela 40 – Resultados da análise de regressão linear entre os valores de CEa obtidos ao longo das paredes da trincheira e aqueles obtidos em superfície considerando três possíveis relações entre distância separação dos eletrodos e profundidade de prospecção

Relação	Solo	Equação	R ²	p-valor**
$Z^* = 3a*0,105$ $(k= 3*0,105 = 0,315)$	LVd1	$y = 1,664x - 1,220$	0,89	<0,0001
	LVd2	$y = 1,746x - 0,477$	0,10	0,2089
	LAd	$y = 1,230x - 0,549$	0,09	0,2253
	PVe	$y = -1,516 + 10,903$	0,00	0,3481
$Ze = 3a*0,175$ $(k=3*0,175=0,525)$	LVd1	$y = 1,563x - 1,676$	0,90	<0,0001
	LVd2	$y = 3,042x - 1,140$	0,85	0,0002
	LAd	$y = 2,175x - 1,983$	0,85	0,0003
	PVe	$y = 2,241x - 4,382$	0,26	0,0902
Z90	LVd1	$y = 1,085x - 1,706$	0,63	0,0118
	LVd2	$y = 5,988x - 3,314$	0,44	0,0428
	LAd	$y = 2,462x - 3,137$	0,75	0,0033
	PVe	$y = 5,980x - 17,394$	0,94	<0,0001

**Resultado do teste F, probabilidade de erro ao afirmar que há efeito de regressão

Com exceção do PVe a relação que considera a profundidade de prospecção mediana, ou seja, Ze , apresentou melhores resultados. Para o PVe, a relação mais adequada foi aquela em que 90% do sinal da resposta ocorre. Para o LVd1 tanto Ze quanto Z^* poderiam ser empregados. Estes resultados não implicam, entretanto que os erros nas estimativas sejam baixos, pois mesmo para as melhores relações houve pronunciada dispersão dos valores, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Regressão linear entre os valores médios de CEA obtidos ao longo das paredes da trincheira e aqueles obtidos a partir da superfície, para três relações obtidas em literatura entre o espaçamento dos eletrodos “a” e profundidade de prospecção, em a) LVd1, b) LVd2, c) LAd e d) PVe

Os valores das constantes visando obter menores erros entre os valores preditos pelo método da sondagem vertical e aqueles considerados como referência, obtidos nas paredes das trincheiras foram calculados.

A Figura 18 apresenta os resultados para diversos valores de coeficientes e demonstra que os menores valores se encontram na faixa entre 0,3 e 0,7, oscilando em função do solo considerado.

Figura 18 – Variação do erro na predição da CEA em função dos valores de constante utilizados no relacionamento entre separação dos eletrodos e profundidade

Utilizando os coeficientes identificados para a obtenção dos menores desvios para cada solo foram confeccionados os gráficos apresentados na Figura 19. Os valores obtidos para os coeficientes não diferem de modo acentuado daqueles apresentados na literatura havendo, entretanto pequena oscilação entre um solo e outro.

A presença de camadas com características distintas quando CEA foi caracterizada pela sondagem vertical é menos visível que aquele obtido realizada nas paredes. A integração de volumes de solo maiores com o aumento da separação dos eletrodos produz uma suavização nos valores observados e este efeito é esperado (CALIXTO et al., 2010). Os gráficos demonstram, entretanto que podem haver desvios pronunciados ao utilizar a sondagem vertical perdendo inclusive a capacidade de identificar camadas com comportamento distinto como são os exemplos da camada menos condutiva na profundidade de 0,6 m para o LVd1, e abaixo de 0,3 m de profundidade para o LVd2. Também houve valores opostos aos observados nas paredes para as porções acima e abaixo de 0,4 m de profundidade no PVe.

A presença de camadas com características muito distintas das subjacentes altera os valores observados ao longo de todo o perfil, pois a contribuição destas para o sinal total é integrada mesmo quando a separação entre os eletrodos é elevada.

Figura 19 – Comparação entre os valores de CEa de referência obtidos ao longo das paredes das trincheiras com aqueles obtidos na superfície, considerando constantes de relacionamento entre profundidade e espaçamento entre eletrodos com menores erros médios, em a)LVd1, b)LVd2, c)LAd e d)PVe

4.4 Variabilidade espacial

4.4.1 Correlações

Os coeficientes da correlação de Pearson entre a argila e areia são apresentados na Tabela 41, demonstrando forte relacionamento negativo entre as variáveis, sendo possível identificar valores pouco superiores para as correlações nas mesmas camadas, ou seja, na diagonal. O teor médio de silte foi de 21 g kg⁻¹, oscilando entre 20 e 22 g kg⁻¹ para as

camadas, portanto com pequena participação na granulometria e baixa variabilidade o que implica na relação oposta e bem definida entre argila e areia.

Tabela 41 – Coeficientes de correlação entre os teores de argila e areia para as camadas de solo analisadas

		Argila						
		0 a 0,2 m	0,2 a 0,4 m	0,4 a 0,6 m	0,6 a 0,8 m	0 a 0,4 m	0 a 0,6 m	0 a 0,8 m
Areia	0 a 0,2 m	-0,994	-0,982	-0,968	-0,977	-0,994	-0,991	-0,991
	0,2 a 0,4 m	-0,973	-0,997	-0,974	-0,965	-0,992	-0,992	-0,989
	0,4 a 0,6 m	-0,964	-0,975	-0,996	-0,977	-0,976	-0,989	-0,989
	0,6 a 0,8 m	-0,975	-0,972	-0,976	-0,996	-0,980	-0,984	-0,990
	0 a 0,4 m	-0,987	-0,994	-0,976	-0,975	-0,998	-0,996	-0,994
	0 a 0,6 m	-0,984	-0,992	-0,987	-0,980	-0,995	-0,998	-0,997
	0 a 0,8 m	-0,985	-0,990	-0,987	-0,987	-0,994	-0,998	-0,998

Na Tabela 42 é possível verificar a alta correlação para as frações argila e areia nas diversas profundidades, com coeficientes altos entre as camadas para uma mesma fração. Isto demonstra que embora os valores médios para as frações granulométricas oscilem entre os pontos e profundidades, o incremento ou redução dos mesmos em profundidade tende a ser semelhante.

Tabela 42 – Coeficientes de correlação entre os teores de argila e de areia para as camadas analisadas

		Argila						
		0 a 0,2 m	0,2 a 0,4 m	0,4 a 0,6 m	0,6 a 0,8 m	0 a 0,4 m	0 a 0,6 m	0 a 0,8 m
Argila	0 a 0,2 m	-	0,973	0,960	0,972	0,992	0,987	0,987
	0,2 a 0,4 m	0,973	-	0,974	0,969	0,994	0,993	0,991
	0,4 a 0,6 m	0,960	0,974	-	0,976	0,974	0,989	0,989
	0,6 a 0,8 m	0,972	0,969	0,976	-	0,977	0,982	0,990
	0 a 0,4 m	0,992	0,994	0,974	0,977	-	0,997	0,995
	0 a 0,6 m	0,987	0,993	0,989	0,982	0,997	-	0,999
	0 a 0,8 m	0,987	0,991	0,989	0,990	0,995	0,999	-
		Areia						
		0 a 0,2 m	0,2 a 0,4 m	0,4 a 0,6 m	0,6 a 0,8 m	0 a 0,4 m	0 a 0,6 m	0 a 0,8 m
Areia	0 a 0,2 m	-	0,982	0,974	0,981	0,995	0,992	0,993
	0,2 a 0,4 m	0,982	-	0,977	0,969	0,996	0,994	0,991
	0,4 a 0,6 m	0,974	0,977	-	0,979	0,980	0,991	0,991
	0,6 a 0,8 m	0,981	0,969	0,979	-	0,979	0,983	0,990
	0 a 0,4 m	0,995	0,996	0,980	0,979	-	0,998	0,996
	0 a 0,6 m	0,992	0,994	0,991	0,983	0,998	-	0,999
	0 a 0,8 m	0,993	0,991	0,991	0,990	0,996	0,999	-

A relação entre argila e umidade do solo é apresentada na Tabela 43 e para areia e umidade na Tabela 44. Os valores foram sempre altos e em média superiores para a condição de menor umidade para ambas as frações de partícula consideradas, podendo este fato estar relacionado à maior variabilidade nos teores de umidade demonstrado na estatística descritiva (Tabelas 24 e 25).

Tabela 43 – Resultados da correlação entre os teores de argila e umidade do solo para as amostras coletadas na malha

		Argila							
		0 a 0,2 m	0,2 a 0,4 m	0,4 a 0,6 m	0,6 a 0,8 m	0 a 0,4 m	0 a 0,6 m	0 a 0,8 m	
Umidade do solo	Condição “Úmido”	0 a 0,2 m	0,892	0,885	0,865	0,891	0,894	0,890	0,893
		0,2 a 0,4 m	0,943	0,963	0,945	0,932	0,960	0,961	0,957
		0,4 a 0,6 m	0,911	0,925	0,949	0,918	0,925	0,938	0,936
		0,6 a 0,8 m	0,946	0,950	0,959	0,950	0,954	0,961	0,962
		0 a 0,4 m	0,943	0,950	0,930	0,937	0,953	0,951	0,950
		0 a 0,6 m	0,949	0,959	0,955	0,947	0,961	0,964	0,963
		0 a 0,8 m	0,953	0,961	0,960	0,953	0,964	0,968	0,968
	Condição “Seco”	0 a 0,2 m	0,950	0,951	0,938	0,948	0,957	0,956	0,957
		0,2 a 0,4 m	0,944	0,949	0,941	0,946	0,953	0,954	0,955
		0,4 a 0,6 m	0,951	0,955	0,949	0,961	0,960	0,962	0,965
		0,6 a 0,8 m	0,944	0,942	0,937	0,954	0,949	0,951	0,955
		0 a 0,4 m	0,960	0,963	0,953	0,960	0,968	0,969	0,970
		0 a 0,6 m	0,965	0,968	0,960	0,968	0,973	0,974	0,976
		0 a 0,8 m	0,966	0,968	0,961	0,972	0,974	0,975	0,978

Valores altos de correlação foram obtidos mesmo nas relações entre as variáveis tomadas em camadas distintas, por exemplo, o teor de argila na camada de 0 a 0,2 m apresentou coeficiente de correlação de 0,946 e de 0,944 com os teores de umidade na camada 0,6 a 0,8 m nas condições úmido e seco, respectivamente.

Tabela 44 – Resultados da correlação entre os teores de areia e umidade do solo para as amostras coletadas na malha

		Areia							
		0 a 0,2 m	0,2 a 0,4 m	0,4 a 0,6 m	0,6 a 0,8 m	0 a 0,4 m	0 a 0,6 m	0 a 0,8 m	
Umidade do solo	Condição “Úmido”	0 a 0,2 m	-0,900	-0,876	-0,870	-0,899	-0,891	-0,888	-0,893
		0,2 a 0,4 m	-0,947	-0,963	-0,947	-0,936	-0,960	-0,960	-0,957
		0,4 a 0,6 m	-0,914	-0,930	-0,950	-0,919	-0,927	-0,939	-0,937
		0,6 a 0,8 m	-0,949	-0,951	-0,960	-0,954	-0,954	-0,961	-0,962
		0 a 0,4 m	-0,949	-0,945	-0,934	-0,943	-0,951	-0,950	-0,951
		0 a 0,6 m	-0,954	-0,958	-0,957	-0,952	-0,960	-0,963	-0,964
		0 a 0,8 m	-0,958	-0,961	-0,963	-0,957	-0,964	-0,968	-0,968
	Condição “Seco”	0 a 0,2 m	-0,960	-0,951	-0,943	-0,947	-0,959	-0,958	-0,958
		0,2 a 0,4 m	-0,952	-0,948	-0,944	-0,948	-0,954	-0,955	-0,956
		0,4 a 0,6 m	-0,961	-0,954	-0,952	-0,964	-0,962	-0,963	-0,966
		0,6 a 0,8 m	-0,953	-0,937	-0,939	-0,957	-0,949	-0,950	-0,955
		0 a 0,4 m	-0,969	-0,963	-0,957	-0,961	-0,970	-0,970	-0,971
		0 a 0,6 m	-0,975	-0,968	-0,963	-0,970	-0,975	-0,975	-0,977
		0 a 0,8 m	-0,976	-0,967	-0,964	-0,974	-0,975	-0,976	-0,978

As correlações entre a CEa e umidade foram em média superiores às aquelas para os parâmetros relacionados à textura na condição de solo úmido, tendo ocorrido o inverso na condição de solo seco. Os valores podem ser observados nas Tabelas 45 e 46. Os valores de correlação foram mais altos para a condição de solo úmido, com valores inferiores àqueles verificados entre os parâmetros umidade, argila e areia. Não foi possível identificar uma relação entre a separação dos eletrodos e profundidade de maior sensibilidade dos arranjos, o que pode ser explicado pela continuidade das propriedades avaliadas em profundidade e pela correlação entre estas.

Tabela 45 – Resultados da correlação entre a CEa medida na condição de solo úmido e os teores de argila, areia e umidade na condição de solo úmido

		Separação entre eletrodos, m						
		0,19	0,32	0,57	0,95	1,33	1,59	2,22
Umidade	0 a 0,2 m	0,749	0,704	0,653	0,652	0,697	0,730	0,786
	0 a 0,4 m	0,776	0,714	0,666	0,665	0,710	0,749	0,814
	0 a 0,6 m	0,780	0,716	0,669	0,669	0,711	0,751	0,818
	0 a 0,8 m	0,779	0,716	0,671	0,671	0,714	0,754	0,821
Argila	0 a 0,2 m	0,727	0,652	0,606	0,609	0,659	0,705	0,786
	0 a 0,4 m	0,736	0,657	0,609	0,610	0,659	0,708	0,790
	0 a 0,6 m	0,736	0,658	0,609	0,613	0,661	0,711	0,793
	0 a 0,8 m	0,740	0,664	0,614	0,618	0,665	0,714	0,794
Areia	0 a 0,2 m	-0,738	-0,659	-0,612	-0,616	-0,664	-0,712	-0,792
	0 a 0,4 m	-0,740	-0,658	-0,608	-0,609	-0,658	-0,708	-0,791
	0 a 0,6 m	-0,739	-0,659	-0,609	-0,612	-0,661	-0,711	-0,793
	0 a 0,8 m	-0,744	-0,666	-0,615	-0,619	-0,666	-0,715	-0,795

O aumento dos coeficientes de correlação com a elevação das distâncias de separação dos eletrodos pode ser explicado pela atenuação na variabilidade espacial de curta escala, dado que os volumes de solo integrados na mensuração de CEa nestes espaçamentos são gradualmente maiores.

Tabela 46 – Resultados da correlação entre a CEa medida na condição de solo seco e os teores de argila, areia e umidade na condição de solo seco

		Separação entre eletrodos, m						
		0,19	0,32	0,57	0,95	1,33	1,59	2,22
Umidade	0 a 0,2 m	0,627	0,422	0,363	0,481	0,569	0,575	0,688
	0 a 0,4 m	0,592	0,394	0,334	0,441	0,542	0,560	0,683
	0 a 0,6 m	0,598	0,410	0,354	0,458	0,564	0,586	0,706
	0 a 0,8 m	0,608	0,429	0,373	0,472	0,580	0,604	0,722
Argila	0 a 0,2 m	0,653	0,475	0,422	0,527	0,638	0,652	0,753
	0 a 0,4 m	0,652	0,470	0,417	0,516	0,626	0,646	0,748
	0 a 0,6 m	0,651	0,468	0,415	0,514	0,626	0,647	0,749
	0 a 0,8 m	0,653	0,473	0,420	0,519	0,632	0,651	0,753
Areia	0 a 0,2 m	-0,656	-0,472	-0,423	-0,530	-0,637	-0,656	-0,754
	0 a 0,4 m	-0,652	-0,465	-0,414	-0,520	-0,624	-0,645	-0,746
	0 a 0,6 m	-0,651	-0,464	-0,414	-0,520	-0,625	-0,645	-0,747
	0 a 0,8 m	-0,655	-0,472	-0,422	-0,525	-0,631	-0,652	-0,753

4.4.2 Estatística espacial

Houve restrições ao ajuste dos modelos de semivariograma para a maior parte das variáveis. Havia um gradiente definido para a granulometria do solo ao longo do comprimento da área, tornando a distribuição dos valores distinta daquela normal. A tendência foi removida através de uma superfície gerada com um modelo linear. A maior parte dos modelos teve a origem forçada em valores mais baixos e apresentaram alcance bastante reduzido, conforme apresentado nas Tabelas 47 e 48.

As propriedades relacionadas à granulometria e à umidade apresentaram alcances inferiores àqueles identificados para a CEa e bastante próximos ao espaçamento mínimo entre amostras.

Tabela 47 – Parâmetros para os semivariogramas ajustados e para a qualidade da predição espacial para a CEa

Parâmetro	Modelo	C0	C	Alcance; m	C/C0+C; %	VC*
CEa; Solo Úmido; 0,19 m	Esférico	0,021	0,5349	74,1	96	0,85
CEa; Solo Úmido; 0,32 m	Esférico	0,023	0,4766	68,1	95	0,81
CEa; Solo Úmido; 0,57 m	Esférico	0,000	0,2694	66,1	100	0,80
CEa; Solo Úmido; 0,95 m	Esférico	0,000	0,1166	64,0	100	0,77
CEa; Solo Úmido; 1,33 m	Esférico	0,003	0,0604	66,6	96	0,78
CEa; Solo Úmido; 1,59 m	Esférico	0,000	0,0405	68,9	100	0,79
CEa; Solo Úmido; 2,22 m	Esférico	0,000	0,0190	85,0	100	0,83
CEa; Solo Seco; 0,19 m	Esférico	0,018	0,0961	90,2	84	0,78
CEa; Solo Seco; 0,32 m	Esférico	0,000	0,0824	55,1	100	0,65
CEa; Solo Seco; 0,57 m	Esférico	0,000	0,0405	48,9	100	0,54
CEa; Solo Seco; 0,95 m	Esférico	0,001	0,0127	58,4	96	0,62
CEa; Solo Seco; 1,33 m	Esférico	0,001	0,0078	63,0	86	0,67
CEa; Solo Seco; 1,59 m	Esférico	0,001	0,0057	67,9	80	0,69
CEa; Solo Seco; 2,22 m	Esférico	0,001	0,0036	83,8	74	0,77

**Coeficiente de correlação obtido na validação cruzada

Zimback (2001) propôs uma classificação semelhante àquela apresentada por Cambardella (1994), para os valores da dependência espacial. O índice de dependência espacial, obtido pela razão entre a contribuição e o patamar do semivariograma. Segundo a autora a dependência espacial pode ser classificada como fraca quando o valor do índice é inferior a 25%; moderada para valores entre 25% e 75%, e forte para valores $\geq 75\%$.

Tabela 48 – Parâmetros para os semivariogramas ajustados e da qualidade da predição espacial para a umidade do solo, teores de argila e areia

Parâmetro	Modelo	C0	C	Alcance; m	C/C0+C; %	VC*
Argila; 0 a 0,2 m	Esferico	0,243	108,400	32,1	100	0,98
Argila; 0,2 a 0,4 m	Esferico	15,670	113,800	28,0	88	0,98
Argila; 0,4 a 0,6 m	Esferico	54,920	168,700	32,1	75	0,97
Argila; 0,6 a 0,8 m	Esferico	33,820	94,530	28,5	74	0,98
Areia; 0 a 0,2 m	Exponencial	3,723	33,230	24,0	90	0,99
Areia; 0,2 a 0,4 m	Exponencial	8,000	150,000	20,0	95	0,98
Areia; 0,4 a 0,6 m	Exponencial	105,000	114,800	15,0	52	0,97
Areia; 0,6 a 0,8 m	Exponencial	2,000	160,000	37,0	99	0,98
Umidade; Solo Úmido; 0 a 0,2 m	Exponencial	0,008	0,369	23,4	98	0,92
Umidade; Solo Úmido; 0,2 a 0,4 m	Exponencial	0,001	0,187	27,2	99	0,95
Umidade; Solo Úmido; 0,4 a 0,6 m	Exponencial	0,180	0,239	21,0	57	0,92
Umidade; Solo Úmido; 0,6 a 0,8 m	Esferico	0,000	0,155	30,0	100	0,96
Umidade; Solo Seco; 0 a 0,2 m	Esferico	0,010	0,150	31,0	94	0,95
Umidade; Solo Seco; 0,2 a 0,4 m	Exponencial	0,010	0,253	25,0	96	0,96
Umidade; Solo Seco; 0,4 a 0,6 m	Esferico	0,009	0,170	25,0	95	0,96
Umidade; Solo Seco; 0,6 a 0,8 m	Esferico	0,015	0,215	33,0	93	0,94

*Índice de dependência espacial: $C/(C0+C)$; **Coeficiente de correlação obtido na validação cruzada

4.4.3 Mapas

Os mapas obtidos através da predição espacial utilizando os parâmetros dos semivariogramas gerados na Krigagem e são apresentados nas Figuras 20 a 25. Notou-se um padrão com maiores valores de CEa, argila e umidade do solo relacionados à região ao norte dos mapas, situada em posição com menor cota no terreno. Os padrões de distribuição foram semelhantes para estas variáveis comprovando a alta correlação (Tabelas 41 a 46). Os padrões de distribuição espacial em escala mais ampla demonstraram duas regiões nos extremos da área com um gradiente entre as mesmas. Estas regiões se mantiveram nas duas condições de avaliação para a CEa e umidade, com valores mais altos na porção ao norte e oscilações ocorrendo em algumas manchas com menores dimensões. Nas duas condições de umidade a CEa foi reduzida com o aumento da profundidade de prospecção, apresentando comportamento inverso àquele identificado para a umidade gravimétrica e para o teor de argila que foram maiores em profundidade (Tabela 49).

Tabela 49 – Comparação entre os valores médios de argila e de CEa e umidade para as duas condições de umidade do solo

Camada, m	Argila, g kg ⁻¹	Maior Umidade		Menor Umidade	
		Umidade, g kg ⁻¹	CEa, mS m ⁻¹	Umidade, g kg ⁻¹	CEa, mS m ⁻¹
0 – 0,2	246	11,1	3,43	6,5	0,94
0 – 0,4	263	11,3	2,56	7,1	0,76
0 – 0,6	279	11,7	1,98	7,6	0,63
0 – 0,8	292	12,2	1,68	7,9	0,58

*Considerando $k = 0,375$, na relação $z = k * a$, Edwards (1977)

Os teores médios de argila foram de 246, 263, 279 e 292 g kg⁻¹ para as camadas de 0 a 0,2, 0 a 0,4, 0 a 0,6 e 0, a 0,8 m respectivamente, uma variação de 46 g kg⁻¹. Para estas mesmas camadas os maiores e menores valores para a argila foram de 379 e 150, 407 e 169, 426 e 179, 435 e 191 g kg⁻¹ respectivamente. A intensidade de variação horizontal, ou seja, ao longo da área, foi bastante superior àquela encontrada na vertical. No caso da umidade gravimétrica o comportamento foi semelhante na condição com maior umidade, os teores médios foram 11,1, 11,3, 11,7 e 12,2 g kg⁻¹ para as camadas de 0 a 0,2, 0 a 0,4, 0 a 0,6 e 0, a 0,8 m respectivamente, uma variação de 1,1 g kg⁻¹. Para estas mesmas camadas os maiores e menores valores foram 14,4 e 7,9, 14,3 e 8,4, 15,1 e 9,0, 15,6 e 9,4 g kg⁻¹ respectivamente. Para a condição com menor umidade, os teores médios foram de 6,5, 7,1, 7,6 e 7,9 g kg⁻¹ para as camadas de 0 a 0,2, 0 a 0,4, 0 a 0,6 e 0, a 0,8 m respectivamente, uma variação de 1,4 g kg⁻¹. Para estas mesmas camadas os maiores e menores valores foram de 10,2 e 4,1, 10,8 e 4,8, 11,8 e 5,3, 12,3 e 4,9 g kg⁻¹ respectivamente.

A presença de maior intensidade de variação dos parâmetros de composição granulométrica e umidade do solo na horizontal que aquele em profundidade foi identificado também nas leituras de CEa. Na condição com maior umidade, a menor e maior distâncias de separação, 0,19 e 2,22 m, apresentaram valores médios de 3,43 e 1,36 mS m⁻¹ respectivamente, com maiores e menores valores de 1,7 e 5,81 e de 0,98 e 1,87 na mesma ordem.

Na condição de menor umidade a menor e maior distâncias de separação, 0,19 e 2,22 m, apresentaram valores médios de 0,94 e 0,52 mS m⁻¹ respectivamente, com maiores e menores valores de 0,27 e 2,03 e de 0,35 e 0,71 na mesma ordem.

Figura 20 – Mapas de CEA na condição de solo úmido para eletrodos separados em a)0,19 m; b)0,32 m; c)0,57 m; d)0,95 m; e)1,33 m; f)1,59 m e g)2,22 m

Figura 21 – Mapas de CEa na condição de solo com baixa umidade eletrodos separados em, a)0,19 m; b)0,32 m; c)0,57 m; d)0,95 m; e)1,33 m; f)1,59 m e g)2, 22 m

Figura 22 – Mapas de argila para as profundidades, a)0 a 0, 2 m; b)0,2 a 0,4 m; c)0,4 a 0,6 m; d)0,6 a 0,8 m; e)0 a 0,4 m; f)0 a 0,6 m e g)0 a 0,8 m

Figura 23 – Mapas de areia para as profundidades, a)0 a 0, 2 m; b)0,2 a 0,4 m; c)0,4 a 0,6 m; d)0,6 a 0,8 m; e)0 a 0,4 m; f)0 a 0,6 m e g)0 a 0,8 m

Figura 24 – Mapas de umidade gravimétrica na condição de solo úmido para as profundidades, a)0 a 0, 2 m; b)0,2 a 0,4 m; c)0,4 a 0,6 m; d)0,6 a 0,8 m; e)0 a 0,4 m; f)0 a 0,6 m e g)0 a 0,8 m

Figura 25 – Mapas de umidade gravimétrica na condição de solo com baixa umidade para as profundidades, a) 0 a 0,2 m; b) 0,2 a 0,4 m; c) 0,4 a 0,6 m; d) 0,6 a 0,8 m; e) 0 a 0,4 m; f) 0 a 0,6 m e g) 0 a 0,8 m

5 CONSIDERAÇÕES

As diversas etapas do trabalho permitiram gerar resultados que se complementam, auxiliando na compreensão do fenômeno em estudo, para a resposta da hipótese levantada.

O uso de amostras indeformadas para a caracterização da CEa do solo provou-se factível porém com limitações quando a umidade do solo é baixa ou quando os valores de resistência elétrica são elevados.

As amostras indeformadas permitiram obter leituras em umidades distintas, auxiliando na compreensão da importância relativa dos diversos parâmetros com impacto na CEa em condições de umidade elevada a aquelas mais comuns em campo.

Uma ampla gama de variações em diversas propriedades físico-hídricas do solo foi obtida com a amostragem realizada. Diferenças significativas foram observadas para a maior parte das propriedades entre os solos e em menor intensidade ao longo do perfil de cada solo em separado.

Os valores de CEa encontrados são compatíveis com outros trabalhos publicados em solos semelhantes e quase sempre inferiores àqueles encontrados em ambiente de clima temperado.

Os três métodos de mensuração da CEa permitiram obter informações capazes de distinguir a variabilidade ao longo do perfil do solo sendo que a sondagem vertical pode levar a interpretações distintas quanto à variabilidade daquelas obtidas pelos dois outros métodos que permitem maior detalhamento. Os valores médios de CEa obtidos para cada perfil de solo oscilou entre um método e outro porém variações puderam ser caracterizadas pelos três métodos.

A CEa é influenciada por diversas propriedades dos solos e em diferentes intensidades na medida em que a umidade oscila. Dentre as propriedades avaliadas, aquelas relacionadas ao espaço poroso apresentaram maior influência, com destaque para o comportamento oposto entre a micro e macroporosidade e para a importância de separar o volume ocupado por poros com tamanho distinto.

As variáveis relacionadas à constituição granulométrica do solo tiveram influência sobre os valores de CEa observados, porém a passagem da corrente elétrica pelo solo está mais associada à presença de filmes contínuos de água e responderam pela maior parte da

variabilidade identificada nos valores de CEa. A presença dos filmes contínuos de água se deve à presença de poros, e, na medida que o solo perde umidade a importância dos poros de menor tamanho se eleva. A porosidade em solos é dependente em grande escala da presença de agregantes como os argilominerais e matéria orgânica, estando a constituição granulométrica portanto ligada à CEa por este processo.

O estudo da variabilidade espacial foi prejudicado sob o ponto de vista da predição, em função da presença de forte gradiente de granulometria ao longo do plano horizontal. A CEa apresentou elevada correlação com a argila e umidade do solo, com padrões semelhantes para duas condições de umidade. O uso da CEa como ferramenta para regionalizar a composição granulométrica e a umidade do solo no plano horizontal foi evidenciado.

A baixa amplitude e a forte correlação entre o teor de argila e entre o teor de areia ao longo do perfil do solo demonstrou a inexistência de estratificação destas propriedades. O mesmo ocorreu com a umidade do solo. Estas condições tornaram improdutivo o estudo para identificar estratificação no solo com uso da ECa.

No estudo da variabilidade espacial do solo a utilização de diversas distâncias de separação entre eletrodos permitiu caracterizar a CEa em profundidades gradativamente maiores. Embora com pequena amplitude houve relação negativa entre os teores de umidade e CEa e argila e CEa. Este fato é provavelmente explicado pela menor presença de microporos em profundidade, característica da classe dos Latossolos, como aquele presente na área. Este comportamento também foi observado nos Latossolos das etapas anteriores.

6 CONCLUSÃO

Os variabilidade observada pelo método da sondagem elétrica vertical apresenta relação com diversas propriedades de interesse agrônômico e neste trabalho aqueles relacionados ao espaço poroso do solo tiveram destaque.

O método da sondagem permitiu identificar a variação da condutividade elétrica do solo ao longo do perfil, sendo que esta variação foi pouco coerente com aquela observada com um método de referência.

As constantes que melhor relacionaram a distância de separação dos eletrodos no método de quatro pontas igualmente separadas com a profundidade de prospecção, oscilaram entre 0,35 e 0,70 para quatro solos com ampla expressão agrícola no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABREU JUNIOR, C.H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A.F.; ALVAREZ, V.F.C. Condutividade elétrica, reação do solo e acidez potencial em solos adubados com composto de lixo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, , p. 635-647, mar. 2000.
- ALCÂNTARA, G.R. **Variabilidade espacial de características físico-químicas e condutividade elétrica aparente do solo sob plantio direto**. 2010. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Sistemas Agroindustriais) – Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas de Anápolis, Universidade Estadual de Goiás, Goiânia, 2010.
- ALLRED, B.J.; EHSANI, M.R.; SARASWAT, D. Comparison of electromagnetic induction, capacitively coupled resistivity, and galvanic contact resistivity methods for soil electrical conductivity measurement. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 22, p. 215-230, Feb. 2006.
- ALLRED, B.J.; GROOM, D.; EHSANI, R.M.; DANIELS, J.J.; Resistivity methods. In: BALLRED, B.; JEFFREY, D.; EHSANI, R.M. (Ed.). **Handbook of agricultural geophysics**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. chap. 4, p. 85-108.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012. 64 p.
- BECEGATO, V.A. **Aplicação de técnicas geofísicas e geoquímicas em duas glebas agrícolas do noroeste do estado do Paraná e suas relações com fertilizantes fosfatados**. 2005. 198 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- BESSON, A.; COUSIN, I.; SAMOUËLIAN, A.; BOIZARD, H.; RICHARD, G.; Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.79, p.1239-249, May 2004.
- BESSON, A.; COUSIN, I.; BOURENNANE, H.; NICOLLAUD, C.; PASQUIER, C.; RICHARD, G. The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 61, p. 120-132, Aug. 2010.
- BRAGA, A.C.O. **Métodos geoeletricos aplicados**: módulo Hidrogeologia (material didático). Rio Claro: UNESP, Instituto de Geociências, 2002. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br>>. Acesso em: 25 ago. 2010.
- BRANDÃO, Z.N.; ZONTA, J.H.; MEDEIROS, J.; CUNHA, M.; SANTA, R.S.; FERREIRA, G.B. Condutividade aparente e sua correlação com o pH em solos no cerrado de Goiás. In: INAMASU, R.Y.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V. de; BASSOI, L.H.; BERNARDI, A.C.C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2012. p. 162-167.

CALIXTO, W.P.; MARTINS NETO, L.; WU, M.; MACHADO FILHO, H.B.; YAMANAKA, K. Algoritmo genético aplicado a um método de prospecção geoeletrico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 3., 2010, Belém. **Anais...** Belém: SBSE 2010. p. 1-8.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77 p.

CELINSKI, V.G. **Desenvolvimento de sensor elétrico de contato e correlações com atributos do solo visando à agricultura de precisão**. 2008. 53 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles and guidelines. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 455-471, May/June 2003.

_____. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 46, p. 11-45, July 2005.

CORWIN, D.; LESCH, S.M.; FARAHANI, H.J. Theoretical Insight on the measurement of soil electrical conductivity. In: BALLRED, B.; JEFFREY, D.; EHSANI, R.M. (Ed.). **Handbook of agricultural geophysics**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. chap. 3, p. 59-83.

COSTA, M.M. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta para agricultura de precisão em uma área sob cerrado**. 2011. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

DIAS, V.R.M. **Variabilidade espaço-temporal da composição química da precipitação em Cuiabá-MT**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

EDWARDS, L.S. A modified pseudosection for resistivity and IP. **Geophysics**, London, v. 45, p. 1020-1036, May 1977.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FRIEDMAN, S.P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 46, p. 45-70, Sept. 2005.

FUKUE, M.; MINATO, T.; HORIBE, H.; TAYA, N. The micro-structures of clay given by resistivity measurements. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 54, p. 43-53, 1999.

GEBBERS, R.; LÜCK, E.; DABAS, M.; DOMSCH, H. Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale. **Near Surface Geophysics**, Utrecht, n. 7, p. 179-190, Nov. 2009.

GIAO, P.H.; CHUNG, S.G.; KIM, D.Y.; TANAKA, H. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 52, p. 157-175, Feb. 2003.

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

HERMAN, R. An introduction to electrical resistivity in geophysics. **American Journal of Physics**, Boston, v.69, n.9, p.943-952, Jan. 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**, Amsterdam, v. 46, p. 181-202, 2005.

LEZZI, P.B.T. **Testes de aplicabilidade de sonda de eletrorresistividade na avaliação de salinização secundária de solos**. 2008. 92 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2012. 346 p.

LOKE, M.H. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: user's manual for Res2dinv**. 1999. Disponível em: <<http://www.geotomosoft.com/>>. Acesso em: 26 out. 2013.

LÜCK, E.; GEBBERS, R.; RUEHLMANN, J.; SPRANGENBERG, U. Electrical conductivity mapping for precision farming. **Near Surface Geophysics**, Utrecht, v. 7, p. 15-25, Nov. 2009.

LUKAS, V.; NEUDERT, L.; KREN, J. Mapping of soil conditions in precision agriculture. **Acta Agrophysica**, Berlin, v. 13, p. 393-405, Feb. 2009.

MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; VALENCIA, L.I.O.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; SILVA, C.A.; ANDRADE, A.G.; MADARI, B.E.; MEIRELLES, M.S.P. Mapeamento da condutividade elétrica do solo e relação com os teores de argila de um Latossolo Vermelho sob plantio direto no Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 41, p. 1023-1031, dez. 2006.

MARQUES, R.; ZAMPARONI, C.A.G.C.; SILVA, E.C.; MAGALHÃES, A.; GUEDES, S.F.; FORNARO, A. Composição química de águas de chuva em áreas tropicais continentais, Cuiabá-MT: aplicação do sistema clima urbano. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 20, n.1, p. 63-75, jan. 2010.

MCNEILL, J.D. **Electrical conductivity of soils and rocks**. Mississauga: Geonics Ltd., 1980. (Technical Note, 5). Disponível em: <<http://www.geonics.com>>. Acesso em: 13 out. 2013.

MEGABRÁS EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS DE MEDIÇÃO. Disponível em: <<http://www.megabras.com>>. Acesso em: 13 ago. 2011.

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

MOLIN, J.P.; FAULIN, G.D.C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 1, p. 1-5, 2013.

MOLIN, J.P.; RABELLO, L.M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, p. 90-101, jan. 2011.

MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J.; Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, p. 420-426, fev. 2005.

MUNSELL COLOR COMPANY. **Soil color charts**. Baltimore, 1994. 28 p.

NADLER, A. Determining the volume of sampled soil when using the four electrode technique. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 1186-1190, 1980.

NASCIMENTO, C.T.C.; PIRES, A.C.B.; MORAES, R.A.V. Reconhecimento de solos por meio da resistividade elétrica e radiação gama. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 34, p. 383-392, set. 2004.

NASCIMENTO, C.T.C.; FERREIRA, F.J.F.; ANDRADE, L.R.M.; GASPAR, J.C.; PIRES, A.C.B. Reconhecimento de solos por meio da resistividade elétrica e radiação gama. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 26, p. 21-29, jan. 2008.

OGURI, G.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; HEUN, W. Potential use of the Veris apparent EC sensor to predict soil texture under the semi-arid conditions of central Arizona. In: 2009 ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 9., 2009. **Proceedings...** St Joseph: ASABE, 2009. p. 1-8. (Paper, 096488, 2009).

OLIVEIRA, C. de. **Caracterização geofísica do solo para uso em agricultura de precisão**. 2006. 139 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PINCELLI, A.L.S. **Desenvolvimento e ensaios de um sistema de mensuração de condutividade elétrica do solo**. 2004. 96 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

POZDNYAKOVA, L. **Electrical properties of soils**. 1999. 138p. Dissertation (Ph.D. in Agricultural Engineering) – Department of Renewable Resources, University of Wyoming, Laramie, 1999.

RABELLO, L.M.; INAMASU, R.Y.; TORRE NETO, A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; MOLIN, J.P. **Medida de condutividade elétrica do solo adaptada a uma plantadeira**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 4 p. (Circular Técnica, 46).

REIS, L.R. **Utilização da condutividade elétrica para estabelecimento de zonas de manejo em um Latossolo Amarelo-Escuro**. 2005, 102 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas),- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

RESENDE, M.; SANTANA, D.P. Uso das relações Ki e Kr na estimativa da mineralogia para classificação dos latossolos. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: EMBRAPA, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 225-232. (EMBRAPA. SNLCS. Documentos, 12).

RHOADES, J.D.; VAN SCHILFGAARDE, J. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, p. 647-651, 1976.

RHOADES, J.D.; RAATS, P.A.C.; PRATHER, R.J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, p. 651-655, Oct. 1976.

RHOADES, J.D.; KADDAH, M.T.; HALVORSON, A.D.; PRATHER, R.J. Establishing soil electrical conductivity-salinity calibrations using four-electrode cells containing undisturbed soil cores. **Soil Science**, Amsterdam, v. 123, p. 137-141, Apr. 1977.

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**, Madison, v. 53, p. 433-439, Dec. 1989.

ROBAIN, H.; DESCLOITRES, M.; RITZ, M.; ANTAGANA, Q.Y. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 34, p. 237-253, Mar. 1996.

ROY, A.; APPARAO, A. Depth of investigation in direct current methods. **Geophysics**, London, v. 36, n.5, p. 943-959, May 1971.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 83, p. 173-193, Feb. 2005.

SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. **Mapa de solos do Estado de Mato Grosso: zoneamento sócio-econômico ecológico**. Cuiabá: Projeto de Desenvolvimento Agroambiental do Estado de Mato Grosso, 2001. Mapa A001. Escala 1:250.000.

_____. **Mato Grosso: solos e paisagens.** Cuiabá: Entrelinhas; Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral, 2007. 271 p.

SELADJI, S.; CONSENZA, P.; TABBAGH, A.; REANGER, J.; RICHARD, G. The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 61, p. 1043-1055, Sept. 2010.

SHEETS, K.R.; HENDRICKX, L. Non-invasive soil water content measuring using electromagnetic induction. **Water Resources Research**, Boston, v. 31, n. 10, p. 2401-2409, Oct. 1995.

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.G.; WIEBOLD, W.J. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 472-482, June 2003.

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; WIEBOLD, W.J.; BATCHELOR, W.D.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.G.; CLAY, D.E.; PALM, H.L.; PIERCE, F.J.; SCHULER, R.T.; THELEN, K.D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 46, p. 263-283, June 2005.

SZALAI, S.; NOVÁK, A.; SZARKA, L. Depth of investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, Denver, v. 14, p. 15-23, Jan. 2009.

TABBAGH, A.; DABAS, M.; HESSE, A.; PANISSOD, C. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 393-404, May 2000.

TUKEY, J.W. **Exploratory data analysis**, Reading: Addison-Wesley, 1977. 1 v.

VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SANTOS, N.T.S.; SANTOS, F.L. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 683-690, ago. 2012.

VITHARANA, U.W.A.; VAN MEIRVENNE, M.; SIMPSON, D.; COCKX, L.; HOFMAN, G. Agronomic consequences of potential management zones delineated on the basis of EM38DD measurements. **Near Surface Geophysics**, Utrecht, v. 6, p. 289-296, Apr. 2008.

WENNER, F. A method of measuring earth resistivity. **Bulletin of the Bureau of Standards**, Washington, v. 12, p. 469-478, 1915.

WERBAN, U.; KUKA, K.; MERBACH, I. Correlation of electrical conductivity and soil parameters at a long-term fertilization experiment. **Near Surface Geophysics**, Utrecht, v. 7, p. 5-14, Jan. 2009.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade.** 2001. 114 p. Tese (Livro-Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2001.