



Jean Marcos Pereira Dos Santos Reis

**RELAÇÃO ENTRE CONTEÚDO DE ÁGUA E
PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO SOLO MEDIDAS POR
SENSORES EM DIFERENTES GRAUS DE COMPACTAÇÃO**

LAVRAS – MG

2023

JEAN MARCOS PEREIRA DOS SANTOS REIS

**RELAÇÃO ENTRE CONTEÚDO DE ÁGUA E
PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO SOLO MEDIDAS POR
SENSORES EM DIFERENTES GRAUS DE COMPACTAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Orientador
Victor Enmanuel Rodas Arano
Co-orientador

**LAVRAS – MG
2023**

JEAN MARCOS PEREIRA DOS SANTOS REIS

**RELAÇÃO ENTRE CONTEÚDO DE ÁGUA E
PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO SOLO MEDIDAS POR
SENSORES EM DIFERENTES GRAUS DE COMPACTAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO EM 20 de julho de 2023

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Samara Martins Barbosa
Josiel de Jesus Santos

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me deu força, sabedoria e perseverança ao longo dessa jornada acadêmica.

À minha família, em especial à minha mãe, agradeço por todo o amor, apoio incondicional e incentivo constante. Vocês foram meu porto seguro, minha fonte de inspiração e minha motivação para alcançar meus objetivos.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado, compartilhando ideias, fornecendo suporte moral e incentivando-me durante essa jornada acadêmica. Suas palavras de encorajamento foram essenciais para superar os desafios.

Ao meu professor e orientador Dr. Bruno Montoani Silva, que dedicou seu tempo, conhecimento e orientação ao longo deste processo. Seu apoio e orientações valiosas foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao DCS e PPGCS pela infraestrutura, apoio técnico e suporte para realização das atividades de campo e laboratório. A CAPES, CNPq, e FAPEMIG pelos auxílios a projetos de pesquisa que possibilitaram a aquisição dos sensores e materiais utilizados.

RESUMO

A compactação do solo é um processo resultante da diminuição dos espaços porosos devido à aplicação de forças mecânicas, como o pisoteio excessivo de animais ou o uso inadequado de maquinário agrícola. Esse processo afeta negativamente a qualidade do solo, causando mudanças em sua estrutura e impactando a produtividade na agricultura. Para avaliar a compactação do solo, é comumente necessário coletar amostras indeformadas de solo, o que envolve a remoção do solo e a destruição do local de interesse, impossibilitando a reamostragem no mesmo local e demandando um tempo considerável para análise. No entanto, com os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de sensores próximos, tornou-se possível avaliar as propriedades do solo de maneira rápida e eficiente. Neste estudo, o objetivo foi utilizar métodos que se baseiam na relação entre as propriedades elétricas, como resistividade, condutividade elétrica e constante dielétrica, e o conteúdo de água presente no solo, a fim de diagnosticar a compactação do solo. As amostras foram coletadas no campus da Universidade Federal de Lavras - UFLA e passaram por um processo de compactação artificial usando consolidômetro e ensaio de Proctor. Após a compactação, as amostras foram preparadas para leitura com os sensores ML2X e Teros 12 (Sensores de umidade/contéudo de água) e o resistivímetro (sensor de resistividade elétrica). Esses avanços tecnológicos permitiram obter uma análise mais precisa e eficiente das propriedades do solo, oferecendo uma alternativa viável e menos invasiva em comparação com as tradicionais técnicas de coleta de amostras. Este estudo tem como objetivo analisar a relação entre o conteúdo de água no solo e as propriedades elétricas, utilizando sensores em diferentes graus de compactação. Além disso, busca avaliar a acurácia dos sensores de umidade do solo em comparação com o método padrão de estufa, e indicar qual sensor melhor detecta o efeito do grau de compactação. Os dados das propriedades elétricas foram ajustados a modelos matemáticos, sendo esses potencial, logarítmico, polinomial, e foram avaliados de acordo com o R^2 , a raiz do erro médio quadrático (RMSE). O modelo polinomial e potencial foi o que melhor descreveu as relações entre umidade pelo método padrão de estufa e as propriedades elétricas. Portanto, os sensores apresentaram RMSE altos antes de fazer a calibração, tendo a necessidade de calibrar. O sensor Teros 12 apresentou um RMSE aceitável (abaixo de 5%) e foi capaz de detectar melhor o efeito do grau de compactação do solo.

Palavras-chave: Resistividade elétrica; Condutividade elétrica; Constante dielétrica; Densidade do solo; Porosidade; Umidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das Amostras de Coleta.....	15
Figura 2. Materiais utilizados para Coleta.....	16
Figura 3. Coleta das Amostras.....	16
Figura 4. Anéis de coleta.....	17
Figura 5. Ensaio com equipamento consolidômetro.....	18
Figura 6. Ensaio com Proctor.....	18
Figura 7. Ensaio da mesa de tensão.....	19
Figura 8. Estufa.....	19
Figura 9. Preparação das amostras para destorroamento.....	20
Figura 10. Ensaio com o Resistivímetro.....	22
Figura 11. Sensor teros 12.....	23
Figura 12. Especificações sensor Teros 12.....	23
Figura 13. Sensor ML2x.....	24
Figura 14. Leitura com o Sensor ML2x.....	25
Figura 15. Umidade real em relação a umidade sensor Teros 12.....	26
Figura 16. Umidade real em relação a umidade sensor ML2X.....	27
Figura 17. Calibração do sensor Teros 12 utilizando a função potencial.....	28
Figura 18. Calibração do sensor Teros 12 utilizando função polinomial.....	28
Figura 19. Calibração do sensor ML2X utilizando a função potencial.....	29
Figura 20. Calibração do sensor ML2X utilizando a função polinomial.....	29
Figura 21. Calibração do sensor Resistivímetro utilizando a função logarítmica..	30
Figura 22. Calibração do sensor Resistivímetro utilizando a função potencial.....	30
Figura 23. Coeficiente de correlação linear entres as propriedades elétricas do solo e conteúdo de água volumétrico obtido pelo método padrão da estufa.....	31
Figura 24. Após realizar a calibração do sensor Teros 12.....	32
Figura 25. Após realizar a calibração do sensor ML2X.....	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1. COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	9
2.1.1. DENSIDADE DO SOLO.....	9
2.1.2. COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	10
2.1.3. GRAU DE COMPACTAÇÃO.....	10
2.1.4. CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO.....	11
2.2. USO DE SENSORES.....	11
2.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO SOLO.....	12
2.3.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO.....	12
2.3.2. CONSTANTE DIELÉTRICA.....	13
2.3.3. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	14
3. OBJETIVO GERAL.....	15
3.1. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE COLETA DAS AMOSTRAS.....	15
4.2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE COLETA DAS AMOSTRAS.....	16
4.3. ENSAIOS LABORATORIAIS.....	17
4.3.1. UMIDADE DO SOLO.....	20
4.3.2. GRAU DE COMPACTAÇÃO.....	21
4.3.3. RESISTIVÍMETRO.....	21
4.3.4. TEROS 12.....	22
4.3.5. ML2X.....	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5.1. UMIDADE MEDIDA NOS SENSORES X UMIDADE PELO MÉTODO DA ESTUFA.....	25
5.1.1. Umidade pelo sensor Teros 12.....	25
5.1.2. Umidade pelo sensor ML2x.....	26
5.2. PROPRIEDADES ELÉTRICAS X UMIDADE PELO MÉTODO DA ESTUFA.....	27
5.2.1. Condutividade Elétrica.....	27
5.2.2. Sensor ML2X.....	28
5.3.3. Resistivímetro.....	30
5.3. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	31
5.3.1. Condutividade elétrica após calibração.....	31
5.3.2. Constante dielétrica após calibração.....	32
5.3.3. Resistividade elétrica após calibração.....	33
6. CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

A compactação é um processo de degradação física do solo que ocorre devido a uma carga de pressão excessiva devido ao trânsito de máquinas ou ao sobrepastoreio. Tal processo aumenta a densidade do solo e a resistência do solo à penetração, com consequente redução da porosidade total e macroporosidade (ANDOGNINI et al., 2020; COLLARES et al., 2008), reduzindo a infiltração de água, e restringindo o desenvolvimento radicular (BENGOUGH et al., 2011; NOSALEWICZ; LIPIEC, 2014). Esse fenômeno é agravado pelo aumento das operações mecanizadas, máquinas com cargas por eixo superiores a 10 toneladas em solo úmido, levando à compactação das camadas do subsolo (WOLKOWSKI & LOWERY, 2008)

Para avaliar a compactação do solo, podem ser utilizadas metodologias baseadas na sua densidade (EMBRAPA, 2005), sendo esta uma técnica destrutiva que necessita de coleta de amostras que serão descartadas e não poderão ser utilizadas novamente. Assim também a metodologia para a determinação do conteúdo de água volumétrico em um solo utilizando o método padrão da estufa, sendo este um trabalho demorado e moroso (BRILLANTE et al., 2015; MELO et al., 2021; PAHUJA, 2022) sendo necessário uma equipe técnica qualificada. Assim, o uso de sensores e o desenvolvimento de diagnósticos preditivos podem ser uma solução viável como método não destrutivo, mantendo as amostras em seu estado original e portanto extrapolados para não retiradas de amostras no campo, em estudos futuros.

É importante levar em conta o teor de água em um solo, pois ele tende a ser mais compactável devido à estruturação das partículas do solo que se ligam à água circundante atuando como uma espécie de lubrificante (WOLKOWSKI & LOWERY, 2008), além de aumentar a densidade do solo, a área de superfície específica e a redução dos poros.

Normalmente, os sensores usados para estimar o conteúdo de água no solo têm características elétricas, como Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR e Reflectometria no Domínio da Frequência - FDR. Além desses, existem sensores com características alternativas, como o ML2X que mede o teor de umidade volumétrica do solo (θ_v) e através de uma equação pode-se obter o valor da constante dielétrica (K_a); o Teros 12 que têm a capacidade aferir o conteúdo de água volumétrico do solo, a temperatura e condutividade elétrica do solo; e também o sensor X5xtal 250 um modelo de resistivímetro com o qual pode-se obter a resistividade elétrica do solo. Esses sensores podem diagnosticar a distribuição de água no solo. É possível diagnosticar a distribuição de água no solo e sua relação água-solo-ar.

Estudos realizados por MELO (2021) em amostras não deformadas mostraram que a relação entre a resistividade elétrica em diferentes graus de compactação, tem relação com a distribuição e o tamanho dos agregados, com as partículas de argila, e especialmente com a disponibilidade de água do solo. Neste cenário, muitos estudos realizados destacam aspectos relativos ao tema da compactação do solo (FERREIRA, 2010).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. COMPACTAÇÃO DO SOLO

A compactação do solo ocorre quando a estrutura natural do solo é alterada e sua porosidade é reduzida (REICHERT et al.,2007). Esse fenômeno pode ser resultado de diversas atividades humanas, como agricultura intensiva (MEMOLI, 2017), uso de maquinário pesado, tráfego intenso de veículos, pisoteio animal e urbanização desenfreada.

A compactação do solo, afeta as proporções relativas dos volumes de água e ar no solo (RUSER et al., 2006) prejudicando diretamente a retenção e distribuição de água no solo (BALBINO et al., 2004). A estrutura do solo desempenha um papel fundamental na regulação da disponibilidade de água, uma vez que esta fica retida e armazenada nos poros do solo que atuam como reservatório. O fenômeno compactação pode ser explicado levando em conta a grande influência que a água intersticial exerce sobre o solo (SILVA et al., 2010)

A relação entre compactação do solo e umidade pode variar dependendo de alguns fatores, como tipo de solo, grau de compactação e densidade. A compactação aumenta a resistência à penetração do solo (IMHOFF et al., 2000) e à infiltração de água, promovendo maior escoamento superficial e reduzindo a quantidade de água disponível para as plantas. Além disso, a compactação pode levar à formação de camadas impermeáveis, conhecidas como horizontes compactados, que limitam o desenvolvimento das raízes e o acesso delas à água.

2.1.1. DENSIDADE DO SOLO

A densidade do solo é uma propriedade física que descreve a quantidade de massa de solo por unidade de volume total do solo (REICHERT et al.,2010). Já a densidade de partículas é determinada pela relação entre a massa seca do solo e o volume ocupado por essa massa. É um parâmetro fundamental em estudos de solos, pois está intimamente relacionada à qualidade física do solo, é influenciada vários processos e propriedades do solo, como a porosidade, a capacidade de retenção de água, a aeração, a resistência à penetração (TOIGO et al., 2015) e a disponibilidade de nutrientes para as plantas..A compactação pode resultar em

um aumento na densidade do solo e a uma diminuição na porosidade (BATEY e MCKENZIE 2006; ETANA et al. 2013; BOTTINELLI et al. 2014 ; COLOMBI et al. 2017), o que resulta em menor infiltração de água, aumento na predisposição à erosão hídrica (FOLONI et al. 2006) e dificulta o enraizamento de plantas.

2.1.2. COMPRESSÃO UNIAXIAL

A compressão uniaxial é um tipo de carga aplicada a um material que o submete a forças de compressão em uma única direção. Nesse tipo de teste, uma força externa é aplicada axialmente ao material, causando uma redução no comprimento do objeto e um aumento na pressão interna. O teste de compressão uniaxial do solo é realizado por um aparelho denominado consolidômetro (REICHERT et al., 2010), ou célula de carga, que é capaz de aplicar uma carga vertical ao solo em uma única direção. O solo é colocado em uma amostra cilíndrica ou em forma de cubo dentro do consolidômetro, e a carga é aplicada gradualmente ao longo do tempo.

De acordo com RABOT et al. (2018); REICHERT et al. (2016); TASSINARI et al. (2021), essa metodologia sugerida já vem sendo utilizada pela comunidade científica que estuda a Física do Solo, mas ainda não foi realizada uma análise abrangente para avaliá-la em detalhes. TASSINARI et al. (2021) propuseram que a curva de compressão do solo, obtida a partir de testes de compressão uniaxial, pode ser usada para determinar a densidade aparente de referência e estimar o nível de compactação.

2.1.3. GRAU DE COMPACTAÇÃO

Refere-se à forma como as partículas de solo são comprimidas e arrançadas umas em relação às outras. A expressão da relação entre a densidade real do solo, em relação a algum estado padrão ou de compactação máxima, tem-se mostrado útil na caracterização da compactação do solo e resposta das culturas em diferentes tipos (REICHERT et al., 2010)

A importância do grau de compactação reside nas suas influências sobre as propriedades e comportamento do solo. Algumas das principais características afetadas pelo grau de compactação incluem: resistência, permeabilidade, capacidade de suporte e comportamento hidráulico. Os valores de grau de compactação para obtenção dos maiores rendimentos dependem das culturas, das condições climáticas e do tipo de solo, e provavelmente da metodologia de determinação da densidade referência (Proctor ou teste de compressão uniaxial) (SUZUKI et al., 2007).

O grau de compactação do solo é geralmente avaliado por meio de ensaios de laboratório, como o ensaio de Proctor, ou por métodos in situ, como o uso de equipamentos de

compactação e medidas de densidade do solo. Carter (1990) verificou, em condições de campo, rendimento relativo maior ou igual a 95% para as culturas de trigo e cevada com compactação relativa entre 77,5 e 84%, obtendo a densidade referência pelo teste de Proctor normal.

Segundo Suzuki et al. (2007), propuseram que a cultura da soja é favorecida por um grau de compactação intermediário em Latossolo Vermelho Distrófico Típico, e o grau de compactação ótimo para a cultura da soja é de 86%.

2.1.4. CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO

Compreender os efeitos da compactação do solo na disponibilidade de umidade é fundamental para o manejo sustentável dos solos e a conservação dos recursos hídricos, contribuindo de forma sustentável para o bom funcionamento do ciclo hidrológico (GOMES, 2015). A umidade do solo é a quantidade de água presente no solo, sendo este um fator essencial para o crescimento das plantas. De acordo com estudos de Zarehaghi et al. (2017) se houver uma elevada quantidade de água em um solo compactado, isso pode intensificar as deficiências de oxigênio nas raízes, resultando em maiores obstáculos para o crescimento do sistema radicular. Além disso, a umidade do solo também está relacionada à compactação do solo.

A umidade do solo desempenha um papel importante na compactação, pois afeta a plasticidade e a coesão do solo. Quando o solo está úmido, suas partículas podem se unir mais facilmente, aumentando a coesão e tornando-o mais susceptível à compactação (Dias Junior & Pierce, 1996; Silva et al., 2002). Por outro lado, solos muito secos podem se tornar mais quebradiços e também serem propensos à compactação.

A umidade considerada durante o processo de compactação de uma amostra de solo geralmente está em uma faixa de umidade próxima ao potencial matricial associado à capacidade de campo, comumente em torno de 10 kPa (CAVALIERI et al., 2008; KELLER et al., 2011; TASSINARI et al., 2021).

2.2. USO DE SENSORES

A utilização de sensores no solo desempenha um papel significativo em diversas áreas, tais como agricultura, monitoramento ambiental e engenharia civil. Esses sensores viabilizam a aquisição de informações de alta relevância acerca das características do solo, favorecendo uma compreensão aprofundada e a tomada de decisões embasadas em conhecimento substancial. Segundo (Rabello et al. 2005), os métodos empregando propriedades dielétricas são amplamente empregados na atualidade, com uma extensa variedade de sistemas comerciais caracterizados por diferentes aspectos de design, resolução, precisão e custo. Entre

as técnicas dielétricas mencionadas, destacam-se aquelas baseadas no princípio da Reflectometria no Domínio do Tempo (Time Domain Reflectometry - TDR) e na medição de capacitância elétrica.

Bogena et al. (2007) em seu estudo avaliou um sensor de conteúdo de água no solo de baixo custo (sonda ECH₂O modelo EC-5, Decagon Devices Inc., Pullman, WA) usando experimentos de laboratório e de campo. O experimento de campo apresentou uma comparação das medições de conteúdo de água em um solo a 5 cm de profundidade usando sensores TDR e EC-5. O experimento é baseado em uma metodologia padronizada de caracterização de sensores, que utiliza padrões líquidos com permissividade dielétrica conhecida.

Para Adamchuk et al. (2004), apesar da ampla variedade de sensores para solo disponíveis, a maioria deles utiliza um dos seguintes métodos de medição: sensores elétricos e eletromagnéticos, que avaliam a resistividade, condutividade, capacitância ou indutância elétrica, sendo influenciados pelas propriedades do solo. Neste estudo será utilizado os sensores Teros 12, ML2x e Resistivímetro que medem respectivamente as propriedades elétricas do solo.

2.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO SOLO

As propriedades elétricas do solo referem-se às características que podem ser observadas nesse meio, incluindo sua condutividade elétrica, resistividade elétrica e permissividade dielétrica (K_a). Essas propriedades são influenciadas por vários fatores, como a composição do solo, o teor de umidade, a presença de minerais e a estrutura do solo.

A medição dessas propriedades elétricas é geralmente realizada por meio de métodos geofísicos, como a sondagem elétrica ou o uso de sensores de umidade do solo. Portanto, métodos indiretos de medição, principalmente baseados em propriedades elétricas do solo, têm sido adotados com mais frequência nos últimos anos (Calamita et al., 2012; Robinson et al., 2008). Essas informações são valiosas para uma variedade de aplicações agrícolas, ambientais e geotécnicas, fornecendo insights sobre as condições e propriedades do solo.

2.3.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

A resistividade elétrica do solo pode ser considerada um representante das propriedades físicas do solo (BANTON; SEGUIN; CIMON, 1997), é a medida inversa da condutividade elétrica e é uma medida da capacidade do solo em resistir à passagem de corrente elétrica. A resistividade é influenciada por diversos fatores como mineralogia,

textura, distribuição de poros, conteúdo de água, entre outros (SAMOUËLIAN et al., 2005). Solos úmidos tendem a ter baixa resistividade, enquanto solos secos têm alta resistividade. Geralmente é utilizado em experimentos de laboratório para calibração da resistividade elétrica, a exemplo do ajuste de modelos empíricos entre dados de ρ e θ obtido pelo método padrão da estufa. (Samouëlian et al., 2005). A resistividade elétrica do solo é determinada pela aplicação de correntes elétricas ao solo por meio de dois eletrodos, denominados eletrodos de corrente elétrica A e B, e pela medição das variações de potencial resultantes usando dois outros eletrodos, denominados eletrodos de diferença de potencial M e N (SAMOUËLIAN et al., 2005; ROBINSON et al., 2008; MELO et al., 2021).

A estimativa da umidade é conferida pela calibração dos valores de resistividade elétrica em função dos teores de água no solo. De forma geral, os valores de resistividade são mínimos em água e máximos em ar, possibilitando a análise da porosidade e do conteúdo de água no solo (SAMOUËLIAN et al., 2005). A resistividade elétrica do solo é amplamente utilizada em estudos geotécnicos, prospecção mineral, detecção de vazamentos em sistemas de tubulação e investigação ambiental.

2.3.2. CONSTANTE DIELETRICA

A constante dielétrica é uma medida da capacidade do solo de armazenar energia elétrica na forma de um campo elétrico. Ela está relacionada à polarizabilidade do meio, ou seja, a facilidade com que as cargas elétricas se movem e se distribuem no solo quando um campo elétrico é aplicado. Ela muda de acordo com os componentes do solo: para a água, apresenta valores próximos de 80; para os minerais e materiais orgânicos do solo, está entre 2-9; e para o ar é igual a 1. Assim, a constante dielétrica é bastante influenciada pelo θ (Silva et al., 2012; Ramos et al., 2014) conteúdo de água.

É dada pela raiz quadrada da permissividade elétrica que é uma medida da capacidade do solo em armazenar energia elétrica em um campo elétrico. Ela está relacionada à quantidade de água presente no solo. A água é um bom condutor de eletricidade e tem uma permissividade elétrica maior do que a maioria dos minerais presentes no solo. Portanto, a quantidade de água no solo afeta sua permissividade elétrica. A permitividade elétrica do solo é usada em estudos de prospecção de água subterrânea, monitoramento de umidade do solo e análise de propriedades do solo em estudos agrícolas. Choudhury e Bharat. (2018) realizaram um estudo sobre a natureza do colapso da caulinita, onde foram investigados os efeitos de diferentes variáveis pH, concentração de sal e constante dielétrica para analisar sua influência no comportamento da argila.

2.3.3. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade elétrica é uma medida da capacidade do solo em conduzir eletricidade. O solo é um meio que contém água, sais dissolvidos e minerais condutores. A argila, a água e os sais dissolvidos aumentam a condutividade elétrica do solo, enquanto as partículas minerais não-condutoras, como areia, diminuem a condutividade. A condutividade elétrica do solo é importante em aplicações como estudos de irrigação, monitoramento de poluição eletromagnética e mapeamento de recursos hídricos subterrâneos.

A condutividade elétrica aparente do solo tem grande utilidade na estimativa da salinidade dos solos, especialmente em regiões áridas ou semiáridas (BARADARAN MOTIE et al., 2021) tem demonstrado ser uma importante ferramenta para os trabalhos de agricultura de precisão (RABELLO, BERNARDI e INAMASU, 2014).

A medição da condutividade elétrica aparente do solo (EC) é uma tecnologia que se tornou uma ferramenta valiosa para identificar as características físico químicas do solo que influenciam os padrões de rendimento das culturas e para estabelecer a variação espacial dessas propriedades do solo (CORWIN et al., 2003).

Oliveira, Franchini, Debiasi (2011) fizeram um estudo da variabilidade espacial da produtividade da soja, milho-soja e da condutividade elétrica do solo para um Latossolo Bruno, onde concluem que a condutividade elétrica aparente (ECa) e a produtividade da soja apresentaram dependência espacial e foram mapeadas. A produtividade da soja foi significativamente e inversamente correlacionada com a ECa, terminando em que a ECa é um parâmetro útil na definição de zonas de manejos diferenciadas dentro de uma lavoura.

3. OBJETIVO GERAL

Analisar a relação entre conteúdo de água no solo e propriedades elétricas (Condutividade elétrica, Resistividade Elétrica e Constante dielétrica) medidas com sensores em função de diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho distroférico.

3.1. OBJETIVO ESPECÍFICO

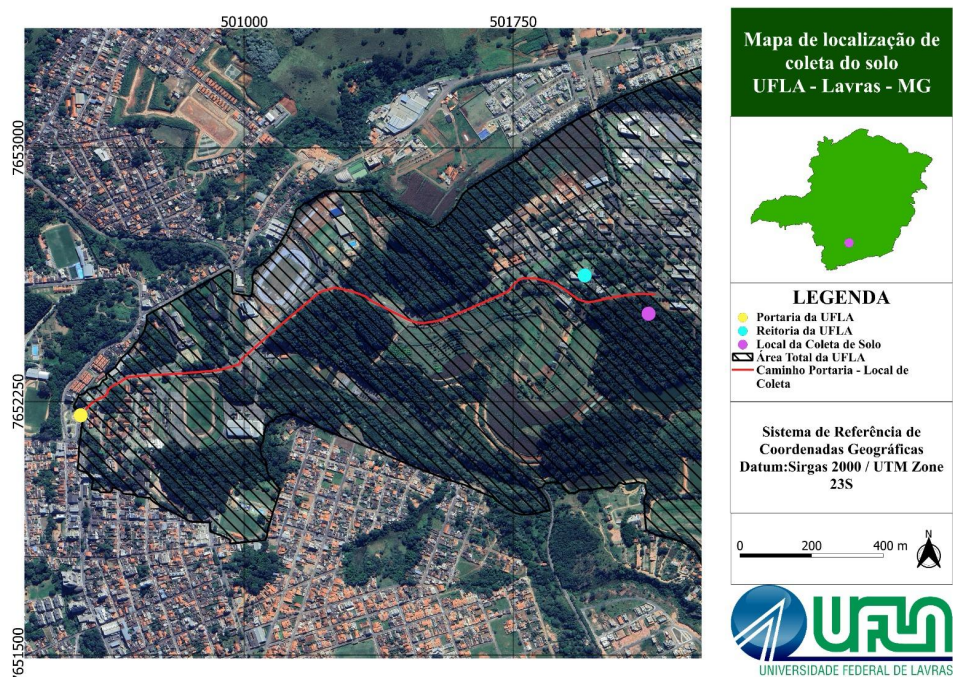
- Avaliar a acurácia (exatidão) de sensores de umidade do solo (TEROS 12, ML2X) em relação ao método padrão da estufa para solo com diferentes conteúdos de água.
- Relacionar o conteúdo de água pelo método padrão com as propriedades Condutividade elétrica, Resistividade Elétrica e Constante dielétrica medidas com sensores (TEROS 12, Resistivímetro e ML2X).
- Verificar qual sensor melhor detecta o efeito do grau de compactação na relação conteúdo de água x propriedade elétrica do solo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE COLETA DAS AMOSTRAS

A coleta das amostras ocorreram no *campus* da Universidade Federal de Lavras, (Figura 1), localizado no município de Lavras - Minas Gerais, nas coordenadas geográficas $-21^{\circ} 13' 44''$ S e $-44^{\circ} 58' 46''$ O.

Figura 1. Localização das Amostras de Coleta



Fonte: Autor, 2023.

4.2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE COLETA DAS AMOSTRAS

As amostras foram coletadas em condições naturais indeformadas, na profundidade 0-15cm. Foram utilizadas enxadas para limpeza do local, um amostrador, uma tábua (15x15cm) para auxiliar na coleta, pois o diâmetro do cilindro é maior que o amostrador, facas para coletar as amostras e plástico filme para armazenar e conservar as amostras, ilustrado na seguintes Figuras 2 e 3.

Figura 2. Materiais utilizados para Coleta



Fonte: Autor, 2023.

Figura 3. Coleta das Amostras



Fonte: Autor, 2023.

Para o estudo deste trabalho, amostrou-se em Latossolo Vermelho Distroférico (LVD), com saturação por base Baixa ($V < 50\%$) e teores de Fe_2O_3 (pelo H_2SO_4) de 180 g kg^{-1} , ambos na maior parte dos primeiros 100cm do horizonte B (inclusive BA) (Santos et al, 2013). O Latossolo Vermelho Distroférico é um solo profundo e bem drenado, com alta capacidade de retenção de água (Mendonça et al., 2013). Apresenta uma estrutura granular, composta principalmente por minerais de argila, como caulinita e óxidos de ferro e alumínio (Cunha et al., 2017). É encontrado em regiões de clima tropical e subtropical, amplamente distribuído no Brasil (Resende et al., 2017).

4.3. ENSAIOS LABORATORIAIS

Para realização da coleta em campo, utilizou-se tubos de PVC que foram cortados em anéis e preparados, para que em uma das extremidades tivesse uma boa penetração no solo, além disso, todos os anéis foram identificados, pesados e medidos. Foram coletadas vinte e oito (28) amostras de solo, sendo três (3) para auxiliar na estimativa de cálculos da umidade.

Todas as amostras coletadas contém um diâmetro médio de 11,10 cm e altura média de 6,80 cm, conforme experimentos realizados por (Michot et al., 2003; Hadzick et al., 2011; MELO et al., 2021). Ilustração na Figura 4.

Figura 4. Anéis de coleta

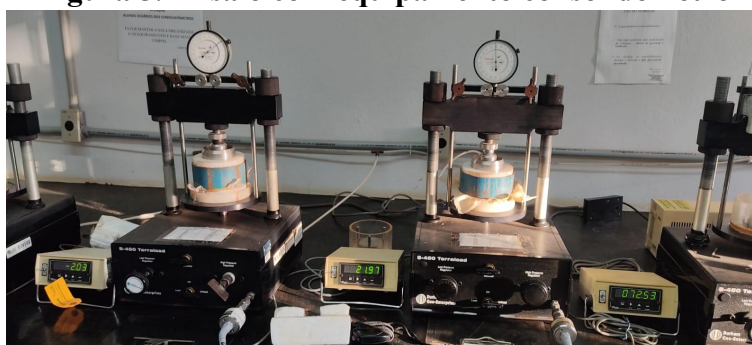


Fonte: Autor, 2023.

O ensaio de compactação das amostras são realizadas em equipamento denominados consolidômetro (Figura 5), com amostras confinadas em anéis que se deformam sob pressão constantes e sem descompressão (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017). e proctor (Figura 6), onde estas amostras foram levadas a três graus de compactação (70%, 90% e 110%).

As amostras com grau de compactação de 70%, não precisaram ser compactadas, visto que, pelos métodos de cálculo de grau de compactação usado para este estudo, o solo coletado já apresentava a condição de compactação natural. Pelo contrário, as amostras com de 90% de grau de compactação foram levadas ao consolidômetro (Figura 5). Já as amostras, que continham 110%, foram levadas tanto para o consolidômetro quanto para o Proctor (Figura 6), pois o consolidômetro não obteve capacidade suficiente para atingir o grau de compactação como o Proctor.

Figura 5. Ensaio com equipamento consolidômetro



Fonte: Autor, 2023.

Figura 6. Ensaio com Proctor

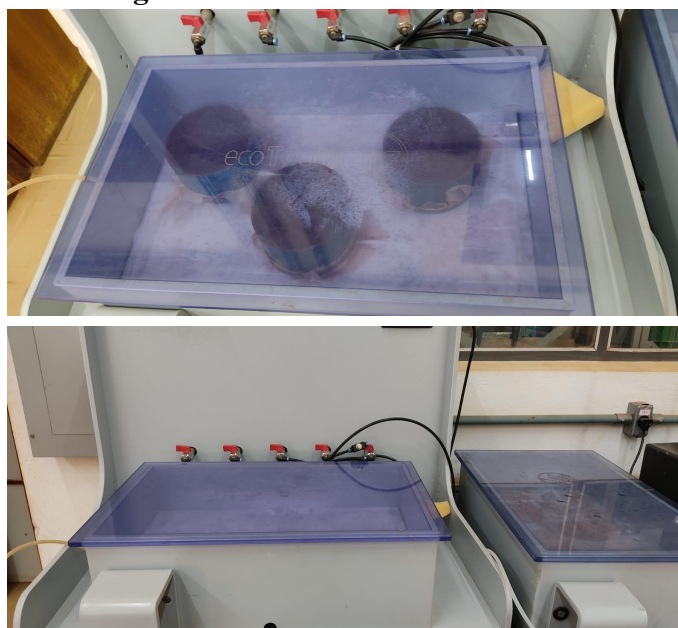


Fonte: Autor, 2023.

As amostras passaram por um processo de saturação com água destilada durante um período 24h. Algumas amostras precisaram ficar por um período maior para alcançar a saturação por completo. As amostras deve-se atingir um potencial matricial próximo à capacidade de campo (Libardi & Saad, 1994; Marciano et al., 1998), para isso, elas foram

levadas a uma mesa de tensão por um período de 24 a 48 horas (Figura 7) a 10 kPa para equilibrar o conteúdo de água nos poros das amostras.

Figura 7. Ensaio da mesa de tensão



Fonte: Autor, 2023.

Depois de serem compactadas e levadas para a mesa de estabilização, as amostras foram pesadas antes de realizar as leituras, com os diferentes sensores ao longo de cada leitura. É importante considerar que, o peso da amostra antes de cada leitura é para estabelecer a umidade gravimétrica realizada através do método de estufa, e assim obter a possibilidade de conter uma correlação com as leituras de umidade entre os diferentes sensores durante o processo da perda de umidade das amostras. Posteriormente, a fim de auxiliar na perda de quantidade de água das amostras, estas foram levadas para estufa (Figura 8) a uma temperatura de 60°C .

Figura 8. Estufa



Fonte: Autor, 2023.

Após a conclusão da última leitura, quando a amostra atingiram um conteúdo de água estimado de mais ou menos 15%, as amostras foram destorroadas e transferidas para uma estufa de laboratório (Figura 9) submetidas a uma temperatura de 105 a 110 °C pelo período de 48 horas, para determinar o solo seco. Esse procedimento é realizado para determinar a quantidade de matéria seca presente no solo (Blake e Hartge, 1986).

Figura 9. Preparação das amostras para destorroamento



Fonte: Autor, 2023.

4.3. ANÁLISE DAS AMOSTRAS E DADOS

4.3.1. UMIDADE DO SOLO

A umidade das amostras foram definidas pelo método de secagem em estufa, para determinar o conteúdo de água real ou umidade gravimétrica (Θg), utilizando a seguinte equação:

Equação 1.

$$\Theta g = \frac{Mu - Ms - tara}{Ms - tara}$$

onde:

- Θg é a umidade gravimétrica (g/g)
- Mu massa de solo úmida
- Ms massa de solo seca

Em virtude da necessidade de comparar a umidade real com a umidade dos sensores, foi-se necessário converter a umidade gravimétrica (Θg), para determinar o conteúdo de água volumétrico ou umidade volumétrica (Θv), utilizando a seguinte equação:

Equação 2.

$$\Theta v = \Theta g \times Ds$$

onde:

- Θg é a umidade gravimétrica (g/g) ou conteúdo de água no solo
- Ds é a densidade do solo

4.3.2. GRAU DE COMPACTAÇÃO

É preciso conhecer a massa de solo seca em estufa para determinar o grau de compactação, sendo assim a determinação do grau de compactação é necessário descobrir a densidade do solo, descrita na equação abaixo

Equação 3.

$$Ds = \frac{Ms}{V}$$

Onde:

- Ds é a densidade do solo
- Ms massa de solo seca (pelo método de estufa)
- Volume do cilindro que é $\pi r^2 \cdot H$

Diante disso, podemos determinar o grau de compactação expresso pela razão da densidade do solo (Ds) sobre a densidade máxima ($Dmáx$):

Equação 4.

$$Gc (\%) = \frac{Ds}{Dmáx} \times 100$$

4.3.3. RESISTIVÍMETRO

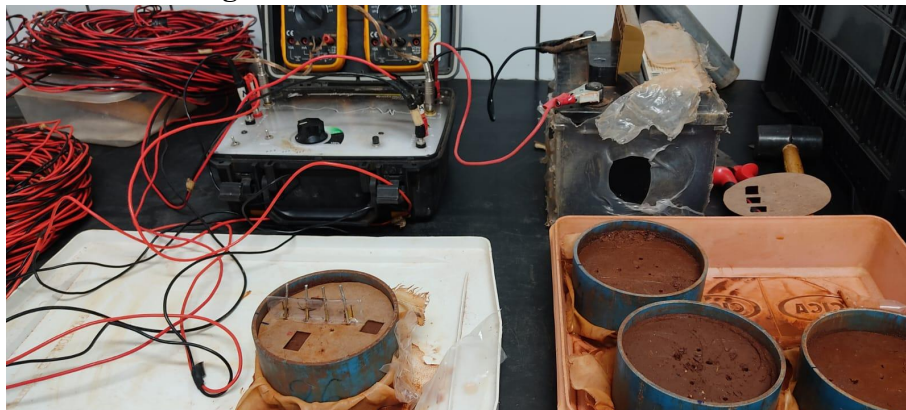
O equipamento resistivímetro, também conhecido como medidor de resistividade, é utilizado para medir a resistividade elétrica de materiais. A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca de um material que indica sua capacidade de resistir ao fluxo de corrente elétrica.

O funcionamento básico de um resistivímetro envolve a emissão de uma corrente elétrica através de eletrodos de teste, na qual eles são inseridos no solo ou em outros materiais para serem avaliados. Este equipamento mede a resistência elétrica entre os eletrodos e, a partir disso, calcula a resistividade do material.

Para as medições de resistividade elétrica, utilizou-se o sensor X5xtal 250 (Auto Energia, Minas Gerais, Brasil)(Figura 10), conectado a dois multímetros, com uma fonte de alimentação de 12 volts. Para a leitura contou-se com quatro eletrodos de forma linear, na ordem (A M N B). Os eletrodos foram posicionados a uma distância de 2cm entre si e

inseridos a uma profundidade de 4 cm nas amostras. Esses eletrodos medem a diferença de potencial entre os eletrodos emissores (A e B) e os eletrodos receptores (M e N), seguindo o método de teste de matriz de Wenner (MELO et al., 2021).

Figura 10. Ensaio com o Resistivímetro



Fonte: Autor, 2023.

Através do equipamento, foram fornecidos os valores de corrente (mA) e tensão (mV) para que fosse possível calcular a Resistividade elétrica (ρ), aplicando-se a seguinte equação :

Equação 5.

$$\rho = \frac{4\pi a}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)} \frac{\Delta V}{I}$$

Onde:

- a é o espaçamento entre os eletrodos (m).
- b é a profundidade de penetração (m)
- ΔV é a diferença de potencial devido à aplicação de corrente elétrica (mV)
- I é a corrente elétrica injetada (mA).

4.3.4. TEROS 12

O equipamento Teros 12 (Figura 11) é um exemplo específico de resistivímetro, fabricado pela empresa METER Group. Ele é usado para medições de resistividade do solo em pesquisas e aplicações agrícolas, geotécnicas e ambientais. O Teros 12 é projetado para medir a umidade do solo, a condutividade elétrica e a temperatura, fornecendo informações valiosas sobre as condições do solo.

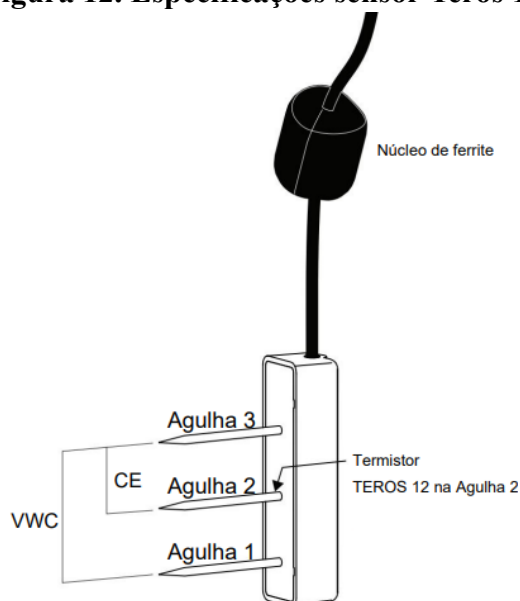
Figura 11. Sensor teros 12



Fonte: METER (2023)

Usando agulhas de aço inoxidável o Teros 12 mede a umidade do solo aplicando o sinal de 70 MHz à agulha 1 e usando as agulhas 2 e 3 como referência, mede a temperatura com um termistor incorporado e mede a condutividade elétrica (CE) do solo entre a agulha 2 e a agulha 3 ilustrado na Figura 12.

Figura 12. Especificações sensor Teros 12



Fonte: Manual METER (2022)

De acordo com o manual do METER (2022), para calcular a condutividade elétrica aparente (CE), o inverso da resistência (condutância) é multiplicado pela constante da célula, que é a razão entre a distância entre os eletrodos e sua área. No caso do sensor TEROS 12, as medições de CE aparente são ajustadas ou corrigidas a uma temperatura de 25 °C para obter a CE exata.

Equação 6.

$$EC_{25} = \frac{EC_t}{[1+0,019(T-25)]}$$

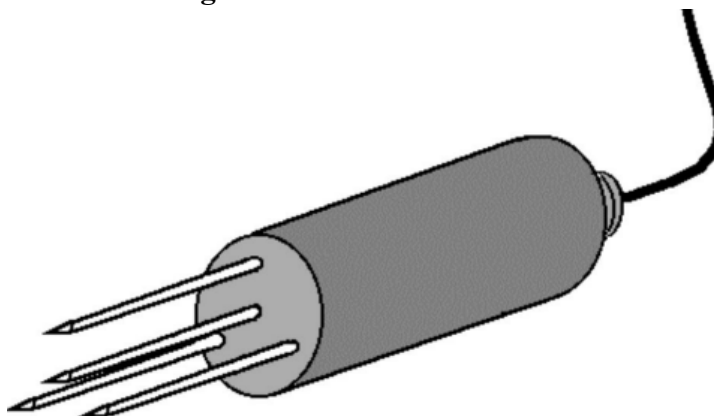
Em que EC_{25} representa a condutividade elétrica padronizada a 25 °C, EC_t refere-se à condutividade elétrica medida pela sonda na temperatura T e T é a temperatura no momento da medição.

4.3.5. ML2X

O Sensor de Umidade do Solo ML2X é um dispositivo usado para medir a umidade do solo de maneira precisa e confiável. Ele é comumente utilizado em aplicações agrícolas, jardinagem, irrigação, monitoramento ambiental e pesquisa científica relacionada ao solo.

O sensor ML2X é projetado para fornecer informações sobre a umidade do solo em diferentes profundidades. Ele consiste em uma sonda que é inserida no solo, e essa sonda contém sondas individuais de umidade em diferentes níveis. Isso permite obter leituras da umidade em camadas específicas do solo, ajudando a entender melhor a distribuição e o perfil de umidade do solo. É importante observar que o sensor ML2X (Figura 14) pode ser utilizado em conjunto com outros sensores e equipamentos para obter uma visão abrangente das condições do solo e do ambiente.

Figura 13. Sensor ML2x



Fonte: Manual Delta-T Devices (1999)

Conforme o manual do fabricante (Delta-T Devices, 1999), a calibração usada na sonda ML2x (Figura 13) foi generalizada considerando os parâmetros padrões $a_0 = 1,6$ e $a_1 = 8,4$ específicos para solos minerais. Para obter a constante dielétrica utilizou-se a equação abaixo:

Equação 7.

$$\sqrt{\varepsilon} = a_0 + a_1 \cdot \theta$$

onde:

$\sqrt{\varepsilon}$ é a raiz quadrada da permissividade dielétrica;

a_0 e a_1 são os parâmetros de calibração, específicos para cada solo;

θ representa o teor de água volumétrico, em m^3/m^3 .

Figura 14. Leitura com o Sensor ML2x



Fonte: Autor, 2023.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

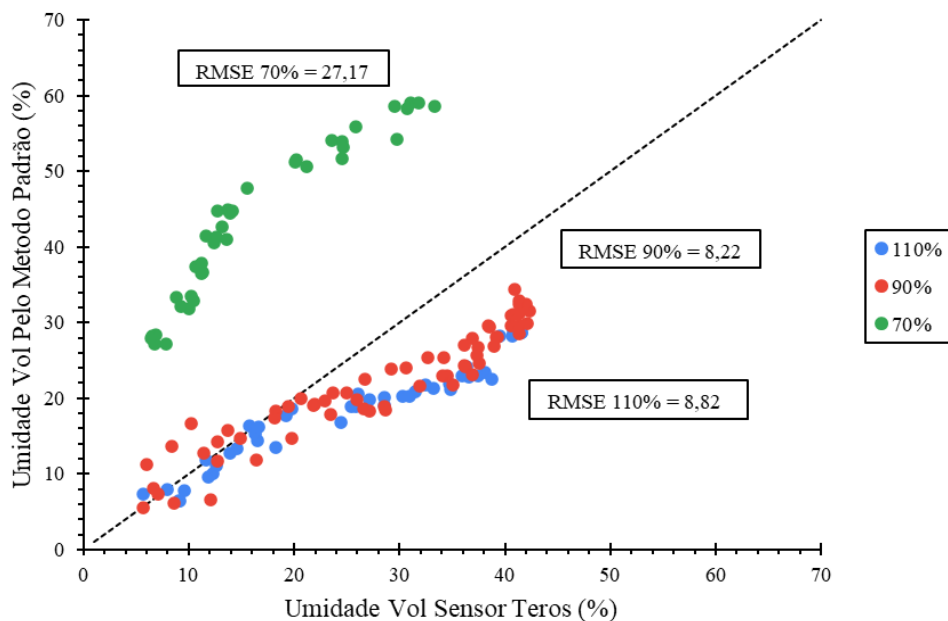
5.1. UMIDADE MEDIDA NOS SENSORES X UMIDADE PELO MÉTODO DA ESTUFA

5.1.1. Umidade pelo sensor Teros 12

Os valores de umidade volumétrica determinados pelo sensor Teros 12 (Figura 15) apresentaram boas leituras para umidades baixas na faixa dos 20% em relação a umidade volumétrica real para os graus de compactação de 90% e 110%). Após a faixa dos 20% de umidade, o sensor já passa a superestimar os valores de umidade, ou seja apresenta valores maiores e em relação à umidade real. Já para o grau de compactação de 70%, o sensor apresenta valores menores comparados com a umidade real, passando a subestimar o valores de umidade.

É necessário calibrar o sensor pois apresenta valores de Raiz Quadrada Média do Erro - RMSE altos, 27,17 para 70%, 8,22 para 90% e 8,82 para 110% grau de compactação. Em vistas de diminuir o RMSE para um valor (<5%) pois, valores próximos de zero são desejados (SILVA et al., 2012).

Figura 15. Umidade real em relação a umidade sensor Teros 12



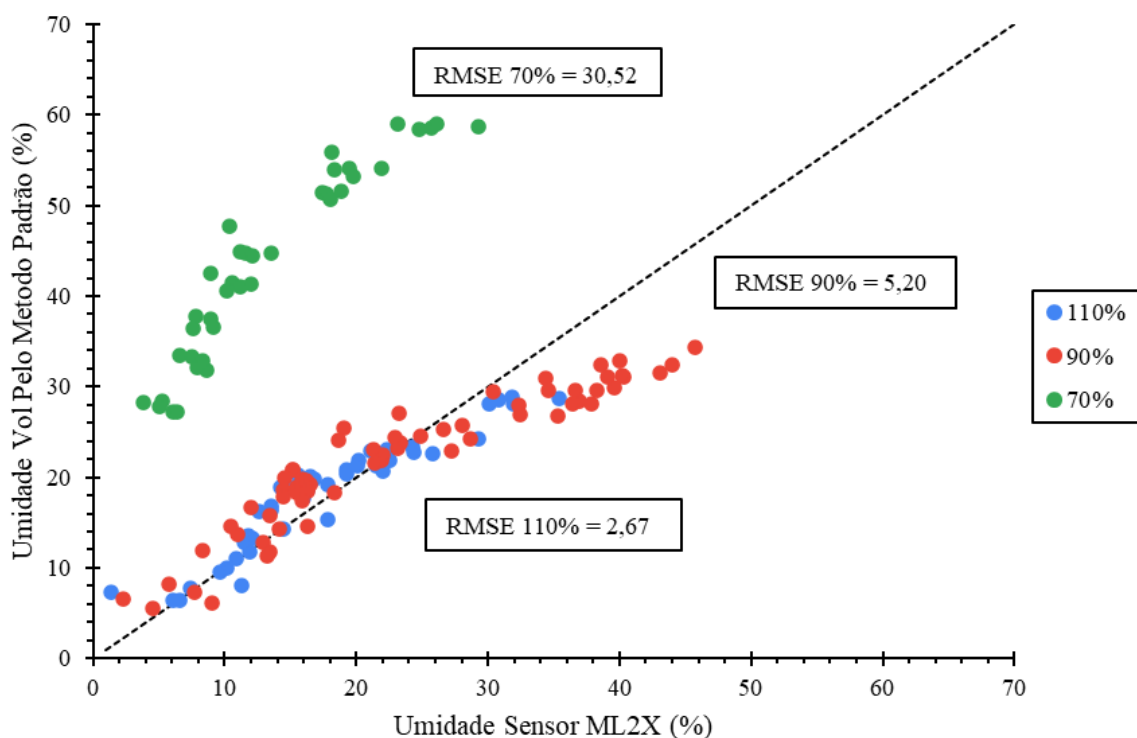
Fonte: Autor, 2023.

5.1.2 Umidade pelo sensor ML2x

Para os valores de umidade volumétrica determinados pelo sensor ML2X (Figura 16) apresentaram leitura para umidades baixas na faixa dos 25%, considerando o grau de compactação de 90% e 110% em relação a umidade real. Após a faixa dos 25% de umidade, o sensor já começa a superestimar os valores de umidade, ou seja apresenta valores maiores e em relação à umidade real. Já para o grau de compactação de 70%, o sensor apresenta valores menores comparados com a umidade real, passando a subestimar o valores de umidade.

A relação umidade real x umidade do sensor ML2X apresentaram valores de RMSE abaixo do aceitável (<5%) para o grau de compactação de 110%, isso mostra que o sensor está calibrado para ler dados de compactação altas, ja para o grau de compactação de 90% apresentou-se valores próximo do aceitável em contrapartida os valores de RMSE para 70% foram altos.

Figura 16. Umidade real em relação a umidade sensor ML2X



Fonte: Autor, 2023.

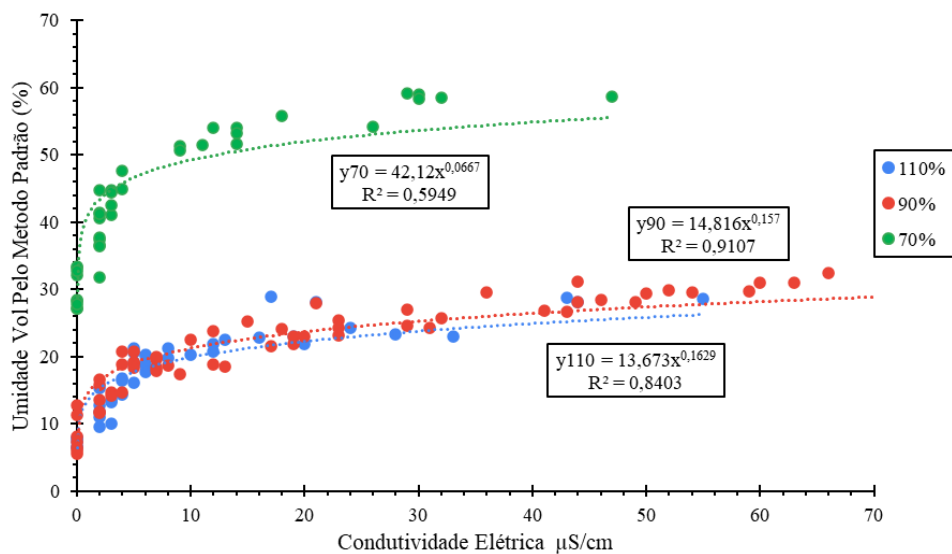
5.2. PROPRIEDADES ELÉTRICAS X UMIDADE PELO MÉTODO DA ESTUFA

Visando comparar os diferentes graus de compactação 70%, 90% e 110%, a umidade realizada pelo método da estufa com relação às propriedades elétricas do solo, Condutividade elétrica, Resistividade elétrica e Constante dielétrica. A acurácia dos modelos de calibração foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), com uso da RMSE (SILVA et al., 2012) e foram utilizadas a função que determinou maior R^2 .

5.2.1. Condutividade Elétrica

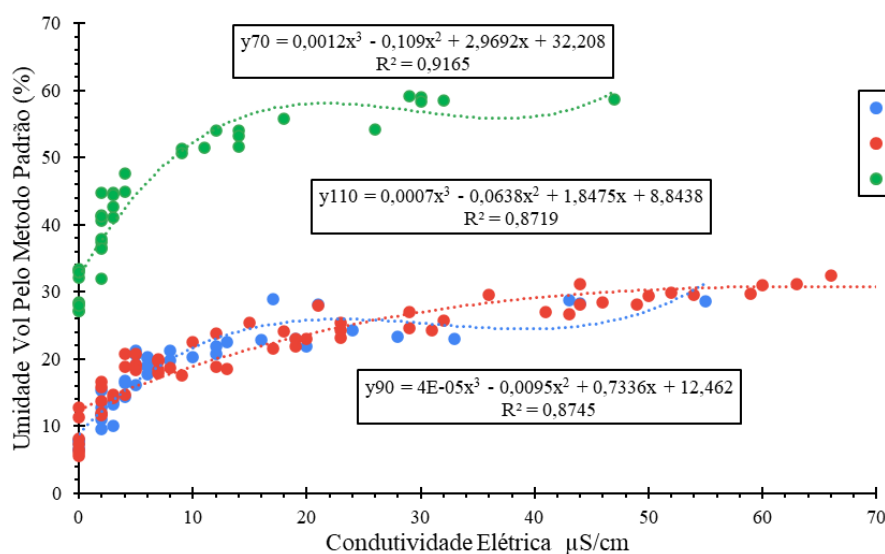
Com o objetivo de obter uma função de calibração foram testadas algumas funções (Figura 17 e 18), com intuito de estimar o teor de água do solo a partir da condutividade elétrica nas condições atuais do solo, portanto a função polinomial apresentou R^2 maior. Em vistas de diminuir o Raiz Quadrada Média do Erro - RMSE para um valor aceitável (<5%) foi realizada a calibração.

Figura 17. Calibração do sensor Teros 12 utilizando a função potencial



Fonte: Autor, 2023.

Figura 18. Calibração do sensor Teros 12 utilizando função polinomial



Fonte: Autor, 2023.

Conforme o resultado da Figura 18, a condutividade elétrica e a umidade volumétrica pelo método padrão estão diretamente relacionadas, conforme a umidade vai aumentando a condutividade também aumenta.

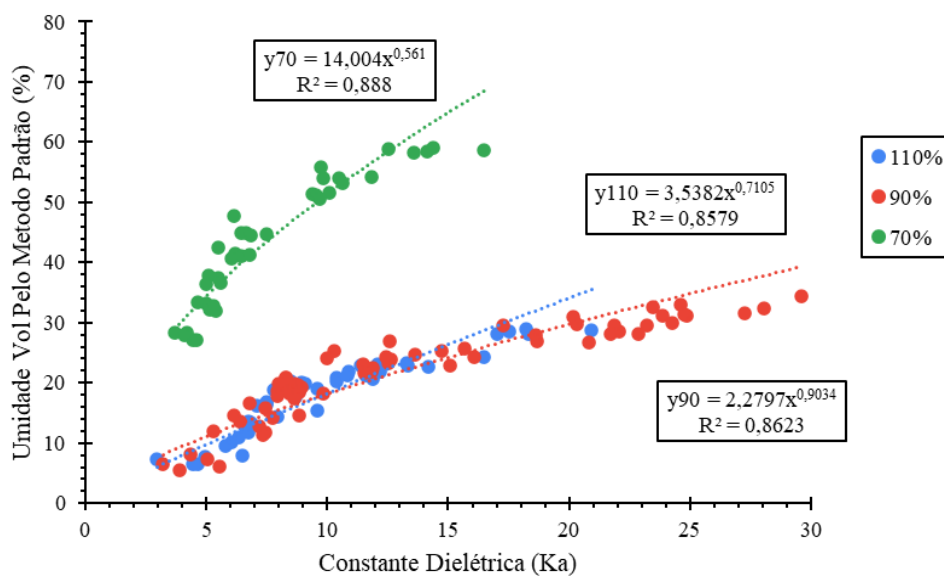
5.2.2. Sensor ML2X

Visando obter uma função de calibração (Figura 19 e 20) para estimar o teor de água do solo a partir da constante dielétrica nas condições atuais do solo, a função polinomial

obteve um R^2 maior. Diante disso, também é necessário fazer a calibração para obter uma raiz quadrada média do erro (RMSE) abaixo dos 5% que é o limite aceitável.

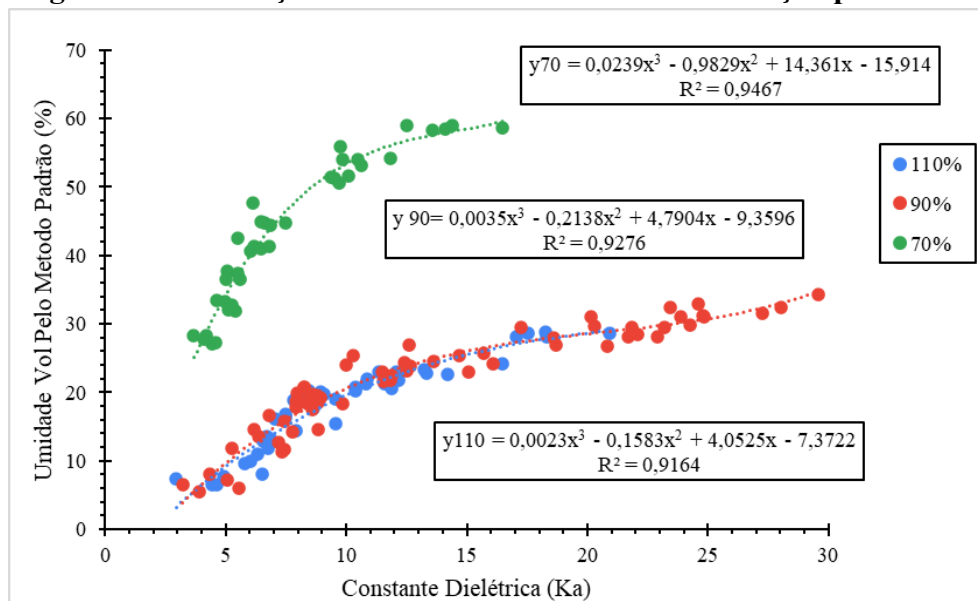
A constante dielétrica também está diretamente relacionada com a umidade real, como apresentado na Figura 20, a condutividade aumenta de acordo com o aumento da umidade volumétrica pelo método padrão.

Figura 19. Calibração do sensor ML2X utilizando a função potencial



Fonte: Autor, 2023.

Figura 20. Calibração do sensor ML2X utilizando a função polinomial



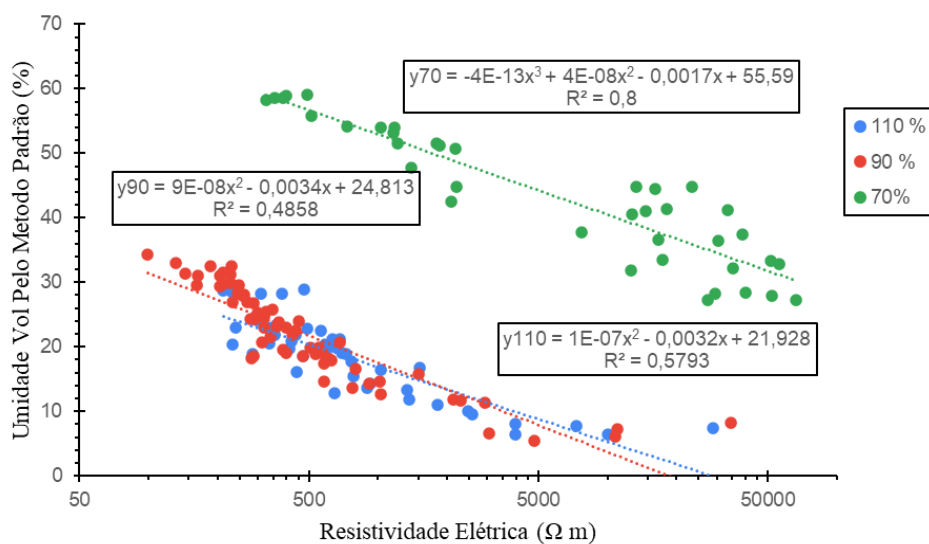
Fonte: Autor, 2023.

5.3.3. Resistivímetro

Diante da função calibração (figuras 21 e 22) utilizada para determinar o teor de água do solo a partir da resistividade elétrica nas condições atuais do solo, a função potencial apresentou um melhor R^2 em relação a logarítmica. Também é necessário fazer a calibração para obter uma raiz quadrada média do erro RMSE (<5%).

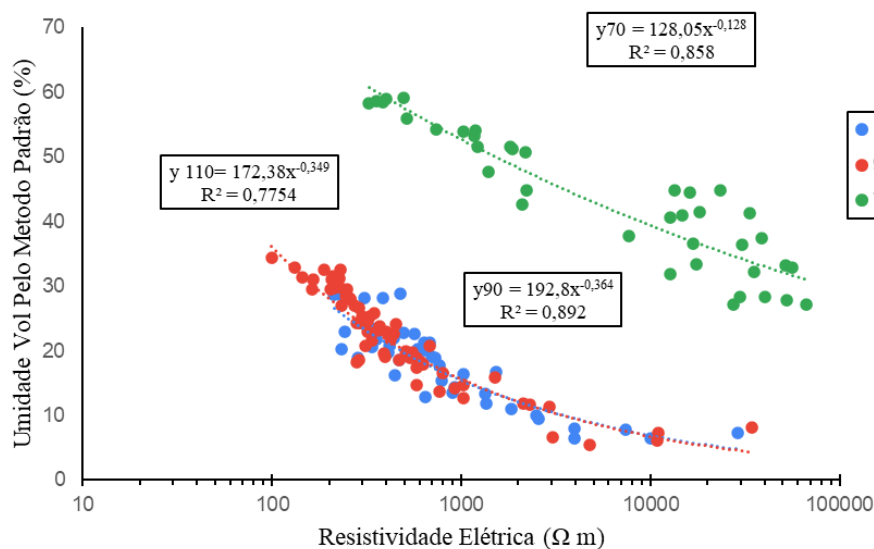
De acordo com gráfico da Figura 22, a resistividade apresenta valores baixos de acordo com o aumento da umidade, tornando inversamente proporcional a condutividade elétrica.

Figura 21. Calibração do sensor Resistivímetro utilizando a função logarítmica



Fonte: Autor, 2023.

Figura 22. Calibração do sensor Resistivímetro utilizando a função potencial



Fonte: Autor, 2023.

Utilizando o software R (Figura 23) foram obtidos a relação das propriedades elétricas (condutividade, constante e resistividade elétrica) em relação com o conteúdo de água real pelo método de estufa em cada grau de compactação. Por tanto, para o grau de compactação de 70% apresentou-se valores de correlação maior na condutividade elétrica (0,833) e na resistividade elétrica (0,810), já para constante dielétrica a correlação foi maior no grau de compactação de 110% (0,925), portanto essa correlação pode explicar que o sensor ML2X responde bem para compactação alta.

Figura 23. Coeficiente de correlação linear entres as propriedades elétricas do solo e conteúdo de água volumétrico obtido pelo método padrão da estufa

Grau de Compactação	Condutividade Elétrica	Constante Dielétrica	Resistividade Elétrica	Unidade Pelo Método Padrão
70%	0,833	0,918	-0,81	
90%	0,813	0,908	-0,47	
110%	0,778	0,925	-0,51	

Fonte: Autor, 2023.

A resistividade elétrica obtida pelo resistímetro apresentou-se valores negativos de correlação, isso explica que resistividade está indiretamente relacionado com o conteúdo de água presente no solo, portanto, quanto maior menor são os valores de resistividade.

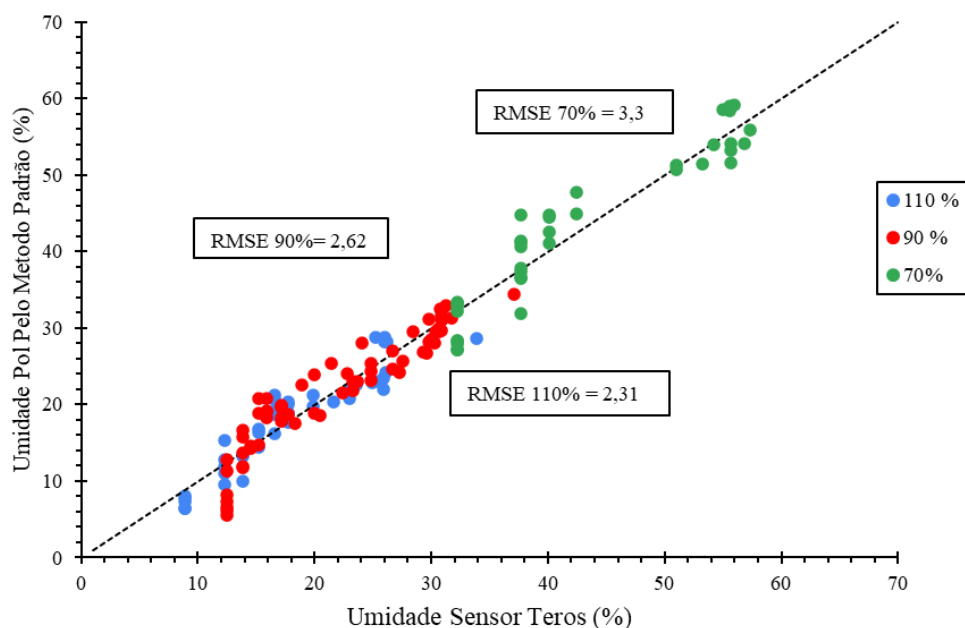
Os valores de correlação da resistividade elétrica variaram na compactação de 70% e 110% , respectivamente o resistímetro prevê indiretamente o efeito de compactação, pois de acordo com o processo de aumento da compactação a relação de conteúdo de água e resistividade elétrica foram baixas .

5.3. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

5.3.1. Condutividade elétrica após calibração

Após calibração (Figura 24), utilizando a função polinomial de terceira ordem o RMSE de ambos grau de compactação reduziram respectivamente, 3,3% para o grau de compactação de 70% e 2,62% para o grau de compactação de 90% tornando aceitável, pois, apresentou-se um RMSE abaixo dos 5%, já para o grau de compactação de 110% o RMSE aumentou para 8,31% fazendo que não fique aceitável.

Figura 24. Após realizar a calibração do sensor Teros 12

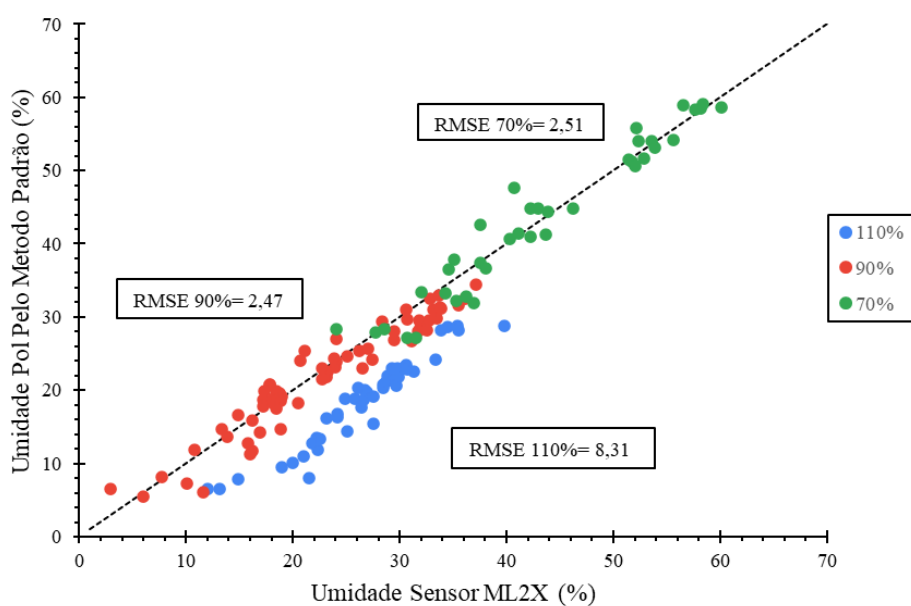


Fonte: Autor, 2023.

5.3.2. Constante dielétrica após calibração

Após calibração (Figura 25), utilizando a função polinomial de terceira ordem o RMSE de ambos grau de compactação reduziram respectivamente, 2,51% para o grau de compactação de 70% e 2,47% para o grau de compactação de 90% tornando aceitável, pois, apresentou-se um RMSE abaixo dos 5%, já para o grau de compactação de 110% o RMSE aumentou para 8,31% fazendo que não fique aceitável.

Figura 25. Após realizar a calibração do sensor ML2X

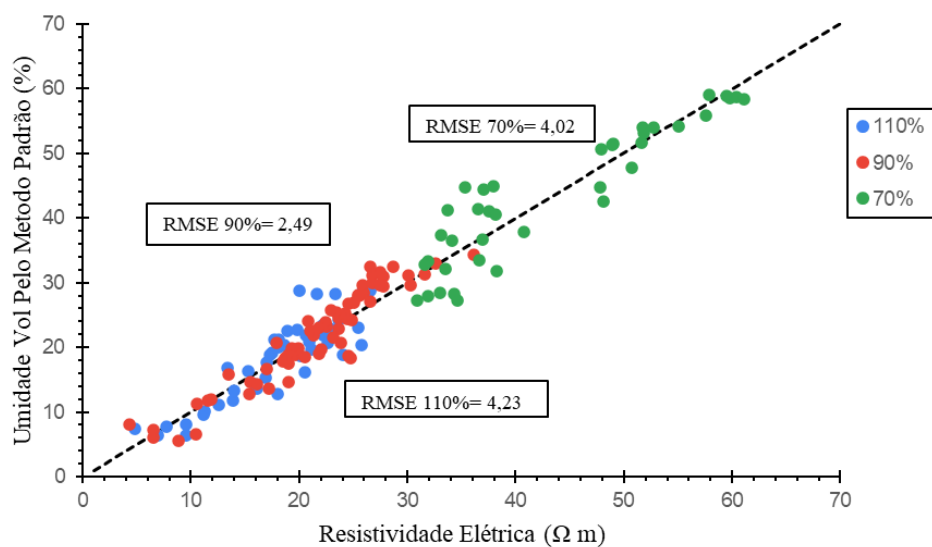


Fonte: Autor, 2023.

5.3.3. Resistividade elétrica após calibração

Após calibração (Figura 26), utilizando a função potencial o RMSE de ambos grau de apresentaram valores respectivamente baixos, 4,02% para o grau de compactação de 70%, 2,49% para o grau de compactação de 90% e 4,23% para o grau de compactação de 110% tornando aceitável, pois, apresentou-se um RMSE (<5%),

Figura 26. Após realizar a calibração do sensor Resistivímetro



Fonte: Autor, 2023

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados, fica evidente que as propriedades elétricas estão diretamente correlacionadas com o teor de água em diferentes níveis de compactação. No entanto, os sensores utilizados demonstraram altos valores de erro quadrático médio (RMSE), o que ressalta a necessidade de calibração para estabelecer uma relação satisfatória entre o teor de água e as propriedades elétricas.

Com o intuito de determinar qual sensor é mais eficaz na detecção do efeito do grau de compactação na relação entre o teor de água e as propriedades elétricas do solo, o resistivímetro X5xtal 250 demonstrou resultados satisfatórios. Na análise da relação entre resistividade elétrica e teor de água, o sensor X5xtal 250 apresentou uma maior precisão e um RMSE abaixo do limite aceitável após a calibração.

Portanto, o sensor X5xtal 250 pode ser utilizado em conjunto com outros sensores e equipamentos para obter uma visão abrangente das condições do solo. Isso possibilita uma melhor compreensão das condições do solo, auxiliando em diversas aplicações, como agricultura, monitoramento ambiental e planejamento de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ADAMCHUK, V. I. et al. On –the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, v. 44, p. 71-91, 2004.
- ANDOGNINI, J. et al. Efeito da compactação do solo na produtividade da aveia preta em Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, e0190157, 2020.
- BALBINO, L.C.; BRUAND, A.; COUSIN, I.; BROSSARD, M.; QUÉTIN, P.; GRIMALDI, M. Change in the hydraulic properties of a Brazilian clay Ferralsol on clearing for pasture. *Geoderma*, v.120, p.297307, 2004.
- Batey T, McKenzie DC (2006) Soil compaction: identification directly in the field. *Soil Use Manag* 22:123–131
- BENGOUGH, AG et al. Alongamento da raiz, estresse hídrico e impedância mecânica: uma revisão das tensões limitantes e características benéficas da ponta da raiz. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, n. 1, pág. 59-68, 2011.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: *Methods of soil analysis, part 1: Physical and mineralogical methods*. 2nd ed., KLUTE, A, (2ed). Madison, Wisc.: ASA, 1986. p.363-375.
- Bottinelli N, Hallaire V, Goutal N, Bonnaud P, Ranger J (2014) Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma* 217:10–17
- CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, v.70, p.425-433, 1990.
- CAVALIERI, K. M. V. et al., Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil and Tillage Research*, v. 98, n. 1, p. 17–26, 1 jan. 2008.
- Choudhury, C., & Bharat, T. V. (2018). Wetting-induced collapse behavior of kaolinite: Influence of fabric and inundation pressure. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(7), 956–967. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0297>
- COLLARES, GL et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade do feijão e trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, pág. 933-942, 2008.
- Colombi T, Braun S, Keller T, Walter A (2017) Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. *Sci Total Environ* 574:1283–1293.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.
- De Jong van Lier Q. Disponibilidade de água às plantas. In: De Jong van Lier Q, editor. *Física do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2010. p.283-98
- DE JONG VAN LIER, Quirijn. *Física do solo - Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo*, 298p, 2010.
- DELTA-T DEVICES. ThetaProbe soil moisture sensor – ML2x: user manual. Cambridge: Delta-T Devices, 1999.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.

- Etana A, Larsbo M, Keller T, Arvidsson J, Schjonning P, Forkman J, Jarvis N (2013) Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma* 192:430–436
- FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BULL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 49-57, 2006.
- H.R. Bogaen, J.A. Huisman, C. Oberdörster, H. Vereecken, Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications, *Journal of Hydrology*, Volume 344, Issues 1–2, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169407003514>
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Applications of the resistance curve in the control of the physical quality of soils under grass. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, p.14931500, 2000.
- KELLER, T. et al., Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, v. 163, n. 1–2, p. 13–23, 15 jun. 2011.
- LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigado por pivô central em Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 18, p. 529-532, 1994.
- MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O.; SAAD, A.M.; LIBARDI, P.L. Variabilidade do potencial matricial e do conteúdo de água num solo em experimento de manejo de irrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, p. 563-571, 1998.
- MELO, L. B. B. DE et al., Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. *Soil and Tillage Research*, v. 208, 1 abr. 2021.
- Memoli, V., et al. "Metal compartmentalization in different biomass portions of *Helianthus annuus* L. and *Sorghum bicolor* L. grown in an agricultural field inside an urban fabric." *Applied Soil Ecology* 121 (2017): 118-126.
- METER Teros11/12. Manual TEROS11/12. 2022.
- NOSALEWICZ, A.; LIPIEC, J. O efeito de camadas compactadas de solo na distribuição vertical de raízes e na absorção de água pelo trigo. *Solo Vegetal*, v. 375, n. 1/2, pág. 229-240, 2014.
- RABELLO, L. M.; VAZ, C. M. P.; NETO, A. T. Sensor capacitivo para sondagem da umidade no perfil de solo. São Carlos : EMBRAPA, Instrumentação Agropecuária, 2005.
- RABELLO, Ladislau Marcelino; BERNARDI, AC de C.; INAMASU, Ricardo Yassushi. Condutividade elétrica aparente do solo. 2014.
- RABOT, E. et al., Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, v. 314, p. 122–137, 15 mar. 2018.
- RAMOS, Fabricio Tomaz et al. Acurácia e calibração de uma sonda de capacitância em um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 6, p. 1631-1641, 2014.
- REICHERT, José Miguel; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, Dalvan José. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em ciência do solo*, v. 5, p. 49-134, 2007.
- RUSER, R, H. Flessa, R. Russow, G. Schmidt, F. Buegger, J.C. Munch,. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and

rewetting, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol 38, Issue 2, 2006, Pag 263-274, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.05.005>.

Santos, G.H. et al., *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. - 3 ed. rev. ampl, Pag 353. - Brasília, DF ; Embrapa, 2013

SILVA, B. M. et al., Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 2, p. 277–286, fev. 2012.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II Grau de saturação em água. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:9-15, 2002.

SOLOS, Embrapa et al. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 3, 2013.

SUZUKI, Luis Eduardo Akiyoshi Sanches et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, p. 1159-1167, 2007. disponível em :

<https://www.scielo.br/j/pab/a/9nWsJjJkz3P69Mq7Sk4fgtn/?lang=pt&format=pdf>

TASSINARI, D. et al., Determination method and strain-attribute interact in the calculation of precompression stress from soil compression curves. *Biosystems Engineering*, v. 210, p. 33–47, 1 out. 2021.

TOIGO, S.; BRAIDA, J.A.; POSSENTI, J.C.; BRANDELERO, E.M.; BAESSO, M.M. Atributos físicos de um Nitossolo Vermelho cultivado com trigo, em sistema plantio direto, submetido à compactação e escarificação. *Engenharia na Agricultura, Viçosa*, v.23, n.1, p.19-28, 2015.

Tsz Him Lo, Daran R. Rudnick, Jasreman Singh, Hope Njuki Nakabuye, Abia Katimbo, Derek M. Heeren, Yufeng Ge, Field assessment of interreplicate variability from eight electromagnetic soil moisture sensors, *Agricultural Water Management*, Volume 231, 2020. Disponível em : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419307048>

Zarehaghi D, Neyshabouri MR, Gorji M, Hassanpour R, Bandehagh A (2017) Growth and Development of Pistachio Seedling Root at Different Levels of Soil Moisture and Compaction in Greenhouse Conditions. *Soil Water Res* 12:60–66