



Pedro Teixeira Valarelli

**RELAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E
RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO EM DIFERENTES
PROFUNDIDADES DE UM LATOSSOLO VERMELHO
AMARELO**

**LAVRAS – MG
2022**

PEDRO TEIXEIRA VALARELLI

**RELAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E RESISTIVIDADE
ELÉTRICA DO SOLO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES DE UM LATOSSOLO
VERMELHO AMARELO**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de
Lavras, como parte das
exigências do curso de
Agronomia, para a obtenção do
título de Bacharel.

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Orientador

Me. Josiel de Jesus Santos

Coorientador

LAVRAS – MG
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais pela vida, pelas oportunidades e educação que me proporcionaram, além do apoio incondicional. Minha mãe, Wilma Teixeira de Andrade e meu pai, Milton Valarelli. As minhas irmãs, Livia Teixeira Valarelli e Luisa Teixeira Valarelli pelo companheirismo. Agradeço às minhas tias e primos pelo carinho e amparo. Aos amigos de Lavras, Viçosa e Carrancas que tanto me ajudaram nesses anos. Aos ex-moradores, moradores e agregados da República Manicômio que tornaram a vida em Lavras muito mais divertida. Aos amigos da Cervejaria do Zinho, a melhor cervejaria de Lavras e região. Agradeço, ao meu orientador, Bruno Montoani Silva, pelos valiosos ensinamentos, e por sempre acreditar na minha capacidade. Ao meu coorientador, Josiel de Jesus Santos, por me auxiliar durante todo o processo de construção do trabalho. A todo grupo de estudantes e trabalhadores do Laboratório de Física do Solo da UFLA, que me ajudaram de forma direta na elaboração deste estudo e também proporcionaram atividades de aprendizagem e ótimas experiências. Dedico esse trabalho a meu querido amigo Raphael da Silva Melo (in memoriam), vulgarmente chamado de Bell, companheiro que não pode estar aqui comigo nessa data, mas que agradeço pelo privilégio de sua amizade. Agradeço aos professores e funcionários da Escola Estadual Dora Matarazzo por conceder um suporte generoso para a conclusão desse trabalho, principalmente nas semanas finais do projeto. Agradeço aos professores pelo conhecimento compartilhado, pelas indagações, pelo crescimento profissional e pessoal ao longo do curso de Agronomia. Agradeço à UFLA e todos seus funcionários que fazem essa instituição ser um ambiente de desenvolvimento da ciência e formação de pessoas.

*“ Toda nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e,
no entanto, é a coisa mais preciosa que temos. ”*

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. HIPÓTESES.....	10
3. OBJETIVOS.....	10
3.1. Geral.....	10
3.2. Específicos.....	10
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
4.1. Compactação do solo.....	11
4.2. Resistividade Elétrica do Solo.....	11
4.3. Resistência do solo à penetração.....	13
4.4. Conteúdo de água do solo.....	14
4.5. Teor de argila do solo.....	15
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
7. CONCLUSÃO.....	29
8. REFERÊNCIAS.....	30

RESUMO

Com o crescente aumento da produtividade agrícola, é necessário a adoção cada vez mais de técnicas de modernização na agricultura. Nesse cenário surge a utilização de sensores para diversos fins, se apresentando como métodos mais rápidos e eficientes para diversas análises, diminuindo assim o tempo para obtenção de resultados. Neste estudo realizado para se obter a relação entre os parâmetros (conteúdo de água do solo, resistência à penetração, teor de argila e resistividade) com a resistência à penetração, objetivou-se realizar um diagnóstico de compactação utilizando parâmetros mais rápidos e com boa eficiência. Foi realizada a coleta de dados e de amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico de textura argilosa. Esses dados foram relacionados com a resistência a penetração (RP), e verificado sua correlação através de parâmetros estatísticos. O experimento foi realizado em um ensaio de compactação do solo, com tratamentos com graus de compactação diferentes com tratamento de descompactação. Foi encontrada a camada com maior resistência à penetração na porção mais superficial do solo. O estudo demonstrou uma baixa relação entre os parâmetros avaliados (Θ , Res, teor de argila) e RP, nas condições em que o estudo foi realizado. Não foi possível diagnosticar a compactação do solo, utilizando parâmetros alternativos, como a resistividade elétrica.

Palavras-chave: Compactação do solo; sensores proximais; estrutura do solo.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de um penetrômetro de impacto	14
Figura 2 - Área de estudo - Fazenda experimental Muquém	16
Figura 3 - Área em que o experimento está localizado	16
Figura 4 - Croqui do experimento	18
Figura 5 - Trator utilizado para realizar a compactação adicional do solo.....	18
Figura 6 - Subsolador utilizado para o tratamento de descompactação do solo.....	19
Figura 7 - Coleta de dados em campo e o aparelho utilizado.....	20
Figura 8 - Esquema mostrando o espaçamento entre os eletrodos	21
Figura 9 - Penetrômetro de Stolf	22
Figura 10 - Coleta das amostras deformadas.....	23
Figura 11 - Gráfico com média global de RP	27

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Correlação entre a resistência à penetração (RP 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) e resistividade (RES 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), p-valor (p) e número de amostras (n)24
- Tabela 2 - Correlação entre a resistência à penetração (RP 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) e umidade do solo (θ 0-15; 15-30 e 30-50 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), p-valor (p) e número de amostras (n)25
- Tabela 3 - Correlação entre a resistência a penetração (RP 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) e teor de argila (Teor de argila 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), p-valor (p) e número de amostras (n)....26
- Tabela 4 - Correlação entre a resistência à penetração em camada fixa compactada (RP 20-30 cm-1) e resistividade (RES 0-15; 0-30 e 0-90 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), p-valor (p) e número de amostras (n).26
- Tabela 5 - Correlação entre a resistência à penetração em camada compactada variável (RP 0-15; 0-30; 0-50 e 0-90 cm-1) e resistividade (RES 0-15; 0-30 e 0-90 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação ρ , p-valor (p) e número de amostras (n).28

1. INTRODUÇÃO

O cenário para as próximas décadas evidencia grandes dificuldades para garantir a segurança alimentar mundial, como a escassez de água, mudanças climáticas e eventos extremos. Projeções indicam que a produção agrícola precisará aumentar em pelo menos 70% para atender às demandas até 2050. O desenvolvimento de agricultura inteligente, portanto, torna-se indispensável para alcançar as metas futuras de produção de alimentos (FAO, 2015).

Os avanços da ciência e tecnologia e seu emprego na agricultura provocou um ganho significativo de produtividade se comparado com décadas anteriores, o aumento da capacidade de produção deve estar acompanhado de práticas sustentáveis de manejo do solo e da água (DE OLIVEIRA, Y. M. M. et al 2018). Atualmente a agricultura brasileira apresenta não apenas limitações referentes à fertilidade, mas também aos atributos físicos. A redução do potencial produtivo e a queda na produtividade das lavouras representam sinais agrônômicos de que a área apresenta problemas limitantes ao desenvolvimento das plantas, podendo estar relacionado a compactação do solo (SANTI et al., 2013). Por conta disso a qualidade física do solo tem sido considerada como um componente fundamental na manutenção da sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola (LIMA, 2004).

O processo de compactação, segundo Keller et al. (2019), consiste na redução do volume de macroporos presentes no solo, aumentando sua densidade, e conseqüente aumento da resistência mecânica à penetração. De acordo com o mesmo autor, esses fatores resultam no impedimento do crescimento radicular, na redução do fluxo de água no solo e sua disponibilidade às plantas, gerando uma baixa taxa de absorção de nutrientes que implica no déficit nutricional das culturas. Nesse processo, ocorrem danos econômicos devido à redução na produtividade agrícola, podendo ser responsável por até 75% de perdas (KELLER et al., 2019). O solo pode ser identificado como compactado quando a proporção de macroporos em relação à porosidade total é inapropriada para o desenvolvimento da planta (KIEHL, 1979).

Atualmente as atividades que mais causam compactação são a carga aplicada ao solo pelo rodado de maquinários (Cavaliere et al, 2009), pisoteio animal e o revolvimento do solo para preparo (grades e arados) (Costa et al, 2009). Entre os fatores internos, o teor de umidade (Lima et al, 2007) e a fração argila no solo (Tavares Filho, 2008) são os fatores que estão mais relacionados com a intensidade da compactação no solo. Estudo realizado por Kluthcouski (1998), com o desenvolvimento do plantio direto (PD) na área, técnica em que não

ocorre o revolvimento periódico da camada superficial do solo, pode resultar em aumento da densidade do solo, uma característica da compactação do solo.

O monitoramento da qualidade do solo é feito por meio de indicadores de qualidade física, química e biológica do solo, a partir de análises laboratoriais ou em campo de propriedades do solo. As técnicas utilizadas devem estar em constante evolução com apontamentos para valores de referência dos indicadores, critérios amostrais, associação de indicadores a funções do solo e serviços ecossistêmicos (Zhang, S et al., 2018). São comumente empregados na avaliação física do solo os atributos resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade, taxa de infiltração de água no solo (GOMES; FILIZOLA, 2006). No entanto, com o avanço de práticas agrícolas voltadas para a agricultura inteligente (*Smart farming*), cada vez mais novas técnicas são demandadas (BÜNEMANN et al., 2018).

2. HIPÓTESES

i) A resistência a penetração (RP) se relaciona com a resistividade elétrica do solo (REs); ii) A relação entre RP e REs é influenciada pela profundidade de medida; iii) A RP se relaciona com o conteúdo de água no solo e com o teor de argila; iii) Os valores de RP da camada mais compactada se relacionam com a REs medida em diferentes camadas.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Verificar a relação entre resistência mecânica do solo à penetração e resistividade elétrica aparente do solo em área de cultivo de grãos sob sistema de plantio direto submetida a diferentes graus de compactação, com e sem subsolagem nessas áreas com Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico de textura argilosa.

3.2. Específicos

- i) Correlacionar RP e resistividade medidas na mesma camada de solo (0-15, 0-30, 0-50);
- ii) Correlacionar RP medida em uma determinada camada e a resistividade medida em camadas usualmente adotadas em equipamentos comerciais (0-30; 0-50 e 0-90cm);
- iii) Correlacionar a RP com conteúdo de água e teor de argila;
- iv) Identificar qual a camada mais compactada (maiores valores de RP) por meio de análise visual dos gráficos de RP x profundidade;
- v) Correlacionar os valores de RP da camada mais compactada com a Res medida em diferentes camadas;
- vi) Correlacionar a RP da camada mais compactada (maior de RP) obtida em cada tratamento com a Res medida em diferentes camadas.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Compactação do solo

A compactação do solo é um problema que se agravou com o uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas em áreas agrícolas. Essa compactação geralmente está presente em uma camada encontrada até, no máximo, a 20 cm. No plantio convencional, essa camada era descompactada pelo uso regular de implementos durante o processo de preparo do solo, dessa forma a compactação é encontrada em camadas mais profundas. No sistema plantio direto, como não é feito esse constante revolvimento, a compactação do solo fica mais restrita à sua superfície (REICHERT 2007). Cada tipo de solo e de cultura responde de formas diferentes à compactação do solo (Foloni et al., 2006).

De modo geral, o solo quando é mantido em seu estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento normal das plantas (ANDREOLA 2000). Um solo desbravado, em que foi retirada a vegetação nativa e introduzido um sistema agrícola, deve necessariamente receber práticas de manejo adequadas juntamente com cobertura vegetal, para não sofrer uma quebra no equilíbrio existente entre suas propriedades químicas, físicas e biológicas, ocasionando a limitação da sua utilização agrícola (RICHART 2005).

4.2. Resistividade Elétrica do Solo

Métodos geofísicos, especialmente a prática de resistividade elétrica do solo, vêm ganhando destaque na ciência do solo por ser não destrutivo, rápido, fácil e possibilita observar a variabilidade espacial do solo (Samouëlian et al., 2005). Essa técnica utiliza um arranjo pré-determinado de eletrodos dispostos no solo para aquisição de dados de corrente e potencial elétrico. O principal uso da tomografia de resistividade elétrica do solo é como um método indireto para estimar o conteúdo de água no solo (Calamita et al., 2012).

Atualmente existem equipamentos arrastados pela superfície do solo, capaz de estratificar o solo em camadas tridimensionais e mensurar a resistividade elétrica de cada

camada do solo. Para isso esse equipamento injeta corrente elétrica no solo e mede a diferença de potencial (tensão) entre os pontos de injeção de corrente. Juntamente com a leitura de resistividade é feito o georreferenciamento do ponto através de um sistema de posicionamento global (GPS), desse modo um mapa tridimensional é produzido ao final da estratificação Patente (Luciano Martins Neto, Wesley Pacheco Calixto 2015).

A resistividade elétrica no solo (REs) é uma propriedade que dá ideia de quanto o solo resiste à passagem de eletricidade. O solo apresenta características que influenciam diretamente na dissipação de corrente elétrica. São exemplos de alguns fatores que influenciam na Res: O conteúdo de água do solo, granulometria, carbono orgânico, temperatura, salinidade, pH, composição química e estrutura, que está relacionada à atributos como densidade do solo, porosidade e distribuição do tamanho de poros (RHOADES et al., 1989; RINALDI & CUESTAS, 2002; SAMOUËLIAN et al., 2005; JAYAWICKREME, 2010; HADZIK, 2011; MELO et al., 2021). Qualquer mudança em algum desses atributos provoca uma alteração na resistividade do solo (Viana, 2016). Logo a qualidade física do solo, que é alterada pela compactação do solo impacta na RES.

Quando o solo apresenta um maior grau de compactação, as partículas que formam o solo estão mais próximas, diminuindo as descontinuidades físicas, proporcionando uma maior condução da corrente elétrica e menor resistividade (Maranhão, 2008). Em solo tropical, (Melo et al. 2021) observaram que o aumento do grau de compactação aumenta a RES em condição de solo mais úmido, e, opostamente, em condição de solo mais seco, o aumento do grau de compactação reduz a RES.

Num meio heterogêneo, a resistividade medida não corresponde unicamente ao valor de uma rocha ou camada, mas sim, uma resistividade média do solo, denominada resistividade aparente, que reflete as propriedades médias do meio pelo qual a corrente passou. Para as diferentes técnicas de aquisição de dados, existem diferentes tipos de arranjos que podem ser utilizados. Estes vão variar de acordo com o objetivo do estudo a ser realizado (Borges, 2007). Para as diferentes técnicas de aquisição de dados, existem diferentes tipos de arranjos que podem ser utilizados. Existem seis diferentes tipos principais de arranjos, a saber: Wenner, Schlumberger Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Polo-Polo e Arranjo Gradiente (Franzini 2015)

O arranjo dipolo-dipolo pode ser usado tanto em sondagens elétricas verticais, como em caminhamentos elétricos, já o método de Schlumberger é empregado para conhecer as

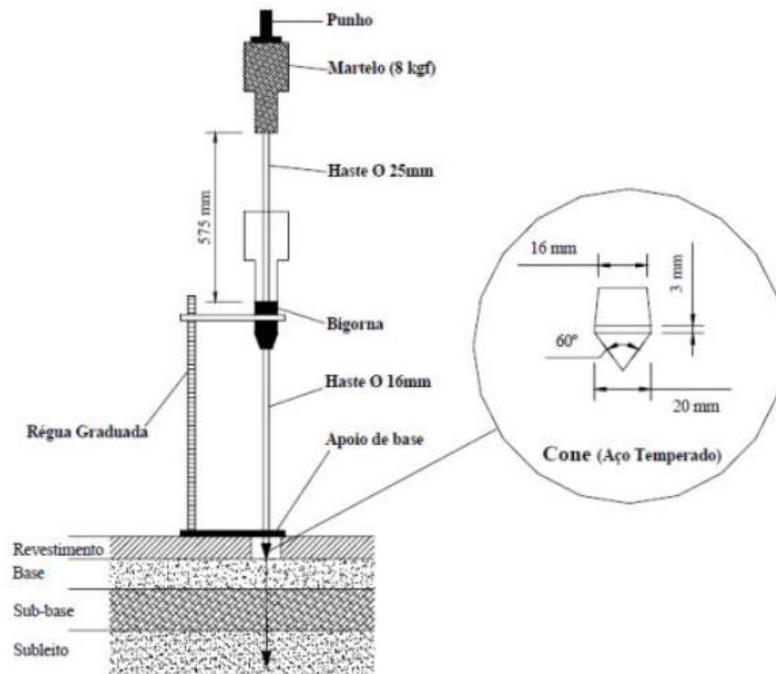
resistividades de camadas mais profundas do solo, usando uma quantidade menor de medições (Borges, 2007), o que confere maior praticidade na execução desse tipo de técnica.

4.3. Resistência do solo à penetração

Conforme Singer e Ewing (2000), um dos atributos mais utilizados como indicador de qualidade física do solo é a resistência do solo à penetração, uma das vantagens desse indicador é que ele leva em conta a profundidade efetiva de enraizamento. Quando o solo é compactado, ocorre o aumento da densidade do solo em um mesmo volume com a redução da sua porosidade e aumento da RP . O diagnóstico da compactação é realizado com o intuito de mediar à resistência do solo à penetração de raízes, utilizando a relação da penetração de uma ponta cônica no solo. Para efetuar essa medida é usado um penetrômetro (Beutler et al., 2003).

O modelo de penetrômetro mais comum é o de Stolf (STOLF, 2014) (Figura 1), que apresenta como princípio a penetração no solo de uma haste com ponteira padronizada, a haste se movimenta através do impacto de um peso de massa fixa a uma altura constante. A leitura da penetração é feita com o auxílio de uma régua ao lado da haste, que é graduada em milímetros e contando o número de impactos realizados. Através do uso do penetrômetro, é possível encontrar qual a profundidade da camada compactada, e com essa informação escolher o implemento mais adequado de descompactação e manejo da cultura. Atualmente existem também modelo de penetrômetro de registro eletrônico de dados e de acionamento manual (PE) e um penetrômetro com registro eletrônico dos dados e acionamento hidráulico (PEH) (Molin 2012). Este índice depende de atributos do solo, os principais são: porosidade, estrutura e teor de água (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Figura 1 - Esquema de um penetrômetro de impacto



Fonte: Fernandes (2015)

Existe uma relação próxima entre RP, conteúdo de água e teor de argila (Imhoff et al., 2000; Tormena et al., 2004; Ribon & Tavares Filho, 2004). O conteúdo de água do solo influi de forma inversamente proporcional a RP. Esse fato se dá devido ao efeito lubrificante da água ao redor das partículas do solo, reduzindo os valores de RP (ALMEIDA *et al.*, 2008).

4.4. Conteúdo de água do solo

A resistência do solo à penetração (RP) é um dos indicadores mais utilizado para diagnosticar o estado de compactação de um solo no sistema plantio direto (SPD), entretanto essa variável sofre forte influência da umidade. A RP sofre um incremento com a redução do conteúdo de água, esse efeito é maior quando o nível ultrapassou a capacidade de campo a -0,1 Mpa (Veen & Boone 1990). Estudos demonstram que quanto maior esse conteúdo, menor será a pressão mensurada pelo equipamento, devido a isso, é recomendado realizar a análise do

conteúdo de água simultaneamente ao teste de resistência à penetração, nas mesmas profundidades (Embrapa 2012).

Caso a umidade não seja levada em conta, o resultado do diagnóstico de compactação pode conter erro, sub ou superestimando. A resistência à penetração tende a aumentar à medida que o solo seca. Como esse teste serve como tomada de decisão no manejo adotado, pode resultar na adoção de uma medida inapropriada de manejo do solo, provocando o aumento dos custos de produção, redução do desempenho produtivo da cultura e prejudicando a saúde do solo.

4.5. Teor de argila do solo

Teor de argila está relacionado com a coesão entre as partículas do solo, (Sá & Santos Júnior, 2005). Quanto maior o teor de argila no solo, menor será o tamanho dos poros e maior a resistência à penetração a uma dada densidade. Quando se compara solos com mesma densidade, os que apresentam um maior teor de argila tendem a manifestar maiores valores de resistência à penetração (Rosolem 1999). Por conta disso em uma mesma densidade, as raízes podem penetrar com uma maior facilidade em um solo arenoso do que em um solo argiloso, ambos com o mesmo conteúdo de água (Livro Arquitetura e propriedades físicas do solo).

5. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área da fazenda experimental Muquém, que pertence à Universidade Federal de Lavras (UFLA) (Figuras 2 e 3). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico de textura argilosa. A média na camada de 0 a 1 metro de profundidade de distribuição de argila, silte e areia da área experimental são de 530, 250 e 220 g kg⁻¹, respectivamente. Está localizado na região dos Campos das Vertentes, com clima do tipo Cwa – temperado chuvoso (inverno frio e seco e verão quente e úmido) (Dantas, 2007),

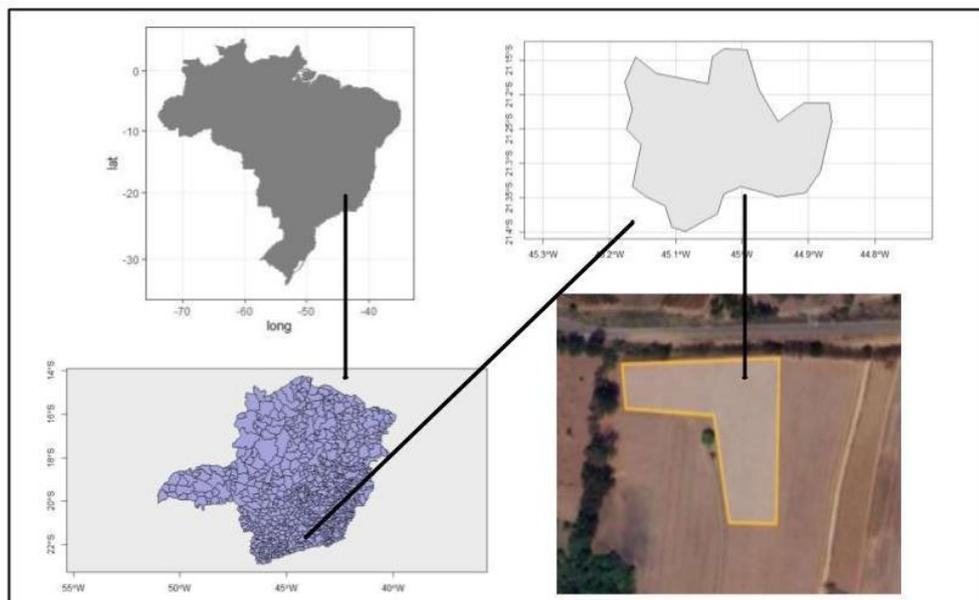
conforme a classificação climática de Köppen (Dantas, 2007). É realizado o cultivo em sequeiro, com plantas anuais, fazendo uma rotação entre plantas leguminosas e gramíneas.

Figura 2 - Área de estudo - Fazenda experimental Muquém



Fonte: Do autor (2022).

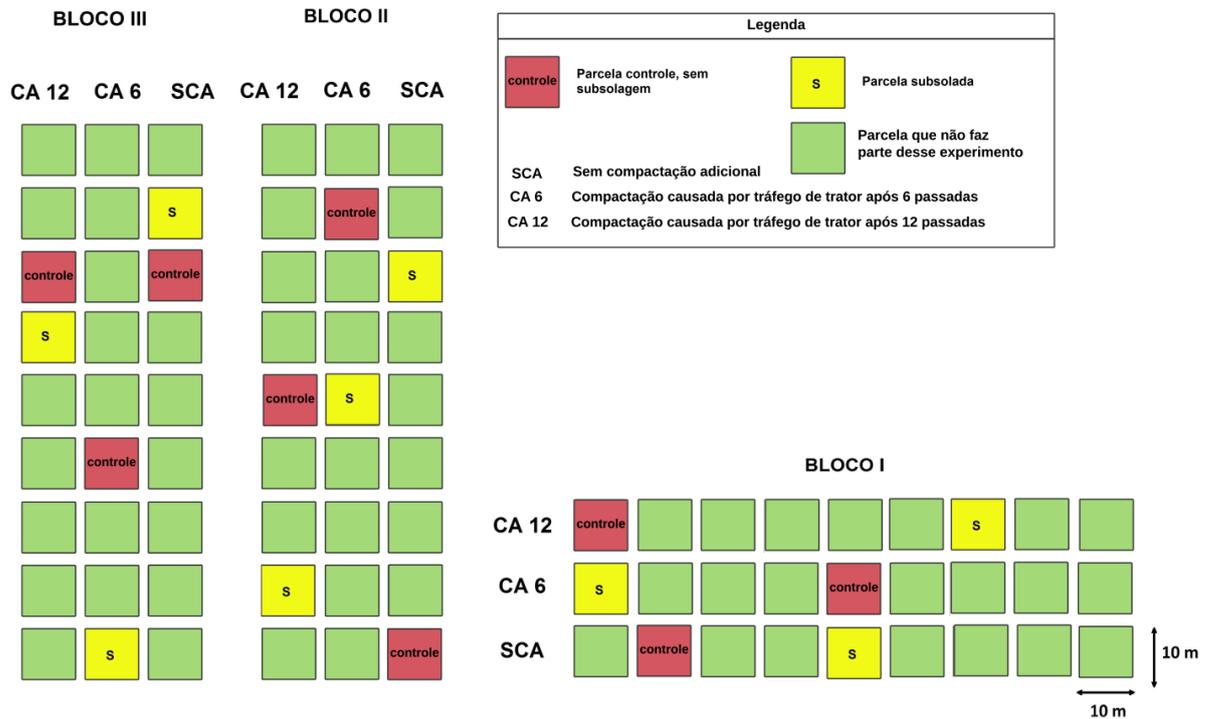
Figura 3 - Área em que o experimento está localizado



Fonte: Paulo (2022).

A área faz parte de um projeto que consiste na busca do melhor manejo em sistema de produção de grãos visando à mitigação da compactação do solo, melhoria das suas propriedades físicas, químicas e biológicas e da produtividade dos cultivos ao longo do tempo. O estudo foi desenvolvido em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial com dois fatores, com três repetições. Como fator 1, a compactação do solo, em que uma faixa não recebeu esse tratamento e as outras duas tiveram graus diferentes de tratamento de compactação adicional. Como fator 2, temos a descompactação, em que uma parcela recebeu um tratamento de descompactação mecânica realizado com um subsolador, e a outra não recebeu esse tratamento. A área foi dividida em três blocos, cada um apresentando seis parcelas de 10 metros de largura e 10 metros de comprimento (Figura 4). Cada bloco foi dividido em 3 faixas, uma faixa não recebeu o tratamento adicional de compactação, permanecendo para efeito de comparação experimental, denominada (SCA). Duas parcelas receberam diferentes níveis de compactação mecânica realizados com uso de um trator Valtra modelo 885 S, pesando 7,8 toneladas e equipado com um jogo 4 rodados pneumáticos do tipo diagonal com 21cm de largura que trafegou na área (Figura 5). Os níveis são constituídos por graus de compactação diferentes: um causado pelo tráfego de trator após 6 passadas (C6), outro a compactação foi causada pelo tráfego de trator após 12 passadas (C12). Para esse estudo foi utilizado o método de diagnóstico do estado de compactação do solo proposto por (PEIXOTO et al., 2019).

Figura 4 - Croqui do experimento



Fonte: Do autor (2022).

Figura 5 - Trator utilizado para realizar a compactação adicional do solo



Fonte: Do autor (2022).

Foi realizado a descompactação mecânica do solo usando um subsolador marca Stara modelo Laser KS com 5 hastes do tipo curva, com 38,0 cm de espaçamento entre as hastes e profundidade de trabalho de 45 cm (Figura 6).

Figura 6 - Subsolador utilizado para o tratamento de descompactação do solo



Fonte: Do autor (2022).

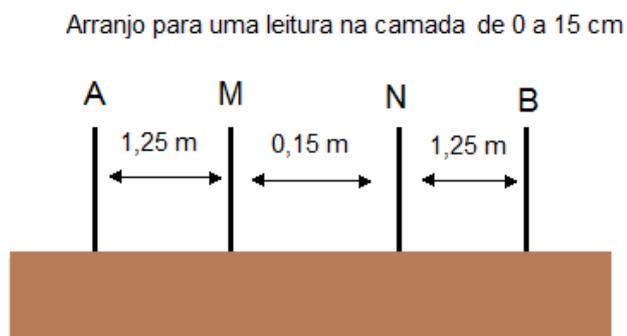
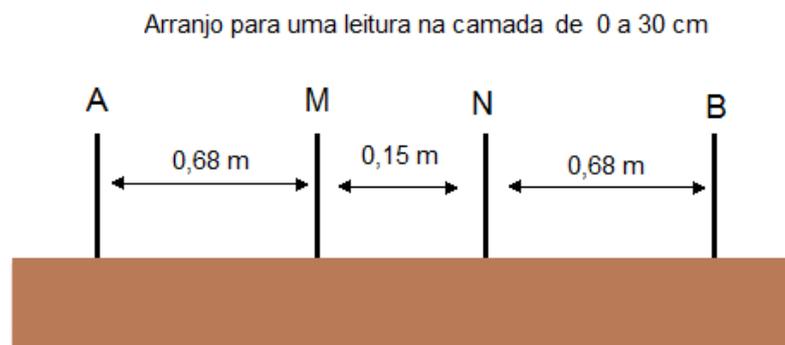
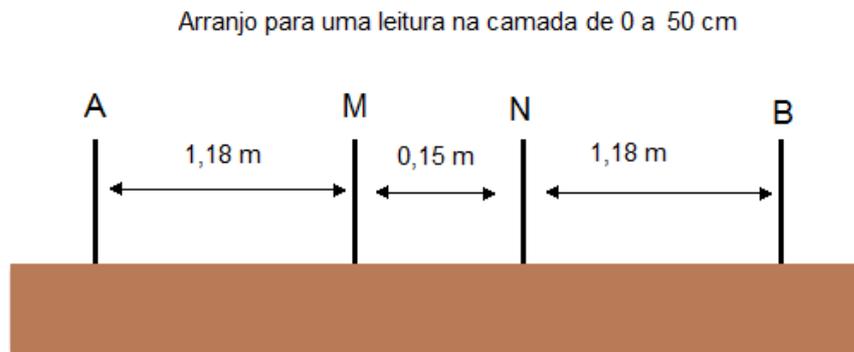
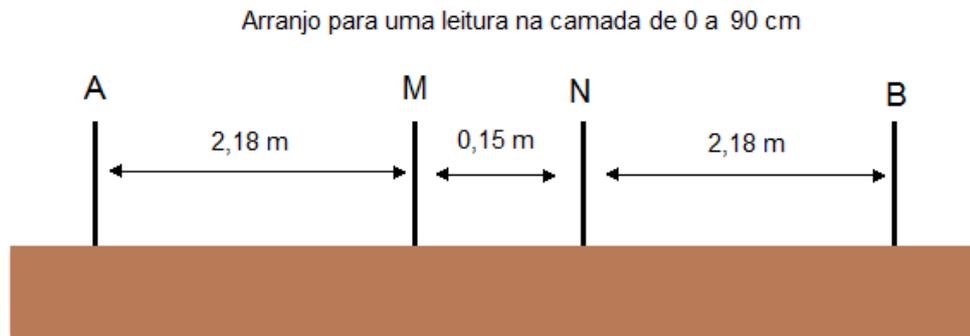
O experimento foi conduzido em condição de sequeiro. As coletas e análises foram realizadas no dia 12/08/2022. Para mensuração da RES foi utilizado um resistímetro marca Alta Energia modelo X5xtal 250, e dois multímetros digitais da marca Hikari modelo HM 2090 (Figura 7). O arranjo utilizado foi do tipo Schlumberger, o transecto adotado foi montado ao centro de cada parcela de estudo e os espaçamentos entre os eletrodos foram devidamente calculados de modo a realizar as leituras nas profundidades de 0-15 cm, 0-30cm, 0-50cm e 0-90cm (Figura 8).

Figura 7 - Coleta de dados em campo e o aparelho utilizado



a: Coleta de dados de REs na Fazenda experimental Muquem UFLA; b: Modelo de resistivímetro utilizado (Alta Energia modelo X5xtal 250). Fonte: Do autor (2022)

Figura 8 - Esquema mostrando o espaçamento entre os eletrodos



Fonte: Do autor (2022).

Para efetuar um estudo de resistência a penetração do solo foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA-PLANALSUCAR/STOLF (Figura 9). As leituras de RP foram realizadas até a profundidade de 60 cm, em 6 pontos diferentes localizados na área central de cada parcela próximo ao local onde ocorreram as leituras da REs. A análise dos dados da RP ocorreu conforme descrito por Stolf *et al.* (2014), utilizando uma planilha elaborada no programa excel.

Figura 9 - Penetrômetro de Stolf



Fonte: Do autor (2022).

Simultaneamente ao ensaio de RP foram coletadas amostras deformadas nas profundidades de 15, 30 e 50 cm, para determinação do conteúdo de água no solo utilizando um trado holandês (Figura 10).

Figura 10 - Coleta das amostras deformadas



Fonte: Do autor (2022).

Após a coleta, as amostras foram armazenadas em pequenas latas devidamente identificadas e levadas ao laboratório de física do solo da UFLA para proceder com as análises. Foi obtido o peso úmido e, após secagem em estufa por 24 horas a 100 °C cada amostra foi pesada novamente para encontrar o valor do peso seco, e pela diferença entre peso úmido e peso seco será calculado o conteúdo de água do solo. (EMBRAPA, 1997), que será correlacionado com os dados de RP.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As relações entre RP e as variáveis θ , REs e o teor de argila não foram estatisticamente significativas ($p > 0,05$), demonstrando uma baixa relação entre os dados avaliados. Os maiores valores de p-valor foram encontrados nas combinações de RP (0-15) e RES (0-15), RP (0-30) e RES (0-15), RP (0-50) e θ (0-15), RP (0-30) e teor de argila de (0-15), e RP (0-30) e teor de argila de (0-50).

O coeficiente de determinação (R^2) foi baixo na maioria das correlações, inferindo em uma baixa relação entre esses parâmetros.

Os dados da correlação entre RP e REs são representados na tabela 1. Os maiores valores de R^2 foram encontrados na camada mais superficial (0-15 cm), em contrapartida, os menores valores foram observados em maiores profundidades.

Tabela 1 - Correlação entre a resistência à penetração (RP 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) e resistividade (RES 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), p-valor (p) e número de amostras (n).

Saída	Entrada	R^2	r	p	n
RP 0-15	RES 0-15	0,290	0,539**	0,033	16
RP 0-15	RES 0-30	0,010	0,099 ^{ns}	0,706	17
RP 0-15	RES 0-50	0,061	0,247 ^{ns}	0,340	17
RP 0-15	RES 0-90	0,016	0,127 ^{ns}	0,639	16
RP 0-30	RES 0-15	0,306	0,553 ^{ns}	0,02	17
RP 0-30	RES 0-30	0,010	0,099 ^{ns}	0,706	17
RP 0-30	RES 0-50	0,016	0,125 ^{ns}	0,621	18
RP 0-30	RES 0-90	0,005	0,068 ^{ns}	0,797	17
RP 0-50	RES 0-15	0,219	0,468 ^{ns}	0,068	16
RP 0-50	RES 0-30	0,008	0,091 ^{ns}	0,727	17
RP 0-50	RES 0-50	0,297	0,545 ^{ns}	0,545	15
RP 0-50	RES 0-90	0,012	0,110 ^{ns}	0,685	16

Legenda: **significativo a 5% de probabilidade; ^{ns}não significativo.

A correlação entre RP e θ nas profundidades de (0-30; 0-50 e 0-90 cm) foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$) apenas para a combinação de RP 0-50 e a RES 0-15, para as demais correlações os resultados não foram estatisticamente significativos ($p > 0,05$).

Tabela 2 - Correlação entre a resistência à penetração (RP 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) e umidade do solo (θ 0-15; 15-30 e 30-50 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), p-valor (p) e número de amostras (n).

Saída	Entrada	R ²	r	p	n
RP 0-15	θ 0-15	0,094	0,306 ^{ns}	0,217	18
RP 0-15	θ 0-30	0,020	0,140 ^{ns}	0,579	18
RP 0-15	θ 0-50	0,019	0,139 ^{ns}	0,583	18
RP 0-15	θ 0-90	-	-	-	-
RP 0-30	θ 0-15	0,035	0,188 ^{ns}	0,469	17
RP 0-30	θ 0-30	0,166	0,408 ^{ns}	0,116	16
RP 0-30	θ 0-50	0,059	0,243 ^{ns}	0,341	17
RP 0-30	θ 0-90	-	-	-	-
RP 0-50	θ 0-15	0,828	0,910*	0,001	18
RP 0-50	θ 0-30	0,023	0,150 ^{ns}	0,552	18
RP 0-50	θ 0-50	0,062	0,248 ^{ns}	0,322	18
RP 0-50	θ 0-90	0,09	0,460 ^{ns}	0,632	17

Legenda: *significativo a 1% de probabilidade; ^{ns}não significativo.

A correlação entre RP e o teor de argila do solo não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$), exceto para a correlação entre RP 0-30cm e o teor de argila da profundidade de 0 a 15cm e 0 a 50 cm.

Tabela 3 - Correlação entre a resistência a penetração (RP 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) e teor de argila (Teor de argila 0-15; 0-30 e 0-50 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), p-valor (p) e número de amostras (n).

Saída	Entrada	R ²	r	p	n
RP 0-15	Teor argila 0-15	0,134	0,366 ^{ns}	0,135	18
RP 0-15	Teor argila 0-30	0,187	0,432 ^{ns}	0,073	18
RP 0-15	Teor argila 0-50	0,211	0,459**	0,055	18
RP 0-15	Teor argila 0-90	-	-	-	-
RP 0-30	Teor argila 0-15	0,228	0,478**	0,045	18
RP 0-30	Teor argila 0-30	0,212	0,460 ^{ns}	0,063	17
RP 0-30	Teor argila 0-50	0,239	0,489**	0,047	17
RP 0-30	Teor argila 0-90	-	-	-	-
RP 0-50	Teor argila 0-15	0,114	0,338 ^{ns}	0,170	18
RP 0-50	Teor argila 0-30	0,179	0,423 ^{ns}	0,080	18
Rp 0-50	Teor argila 0-50	0,179	0,423 ^{ns}	0,080	18

Legenda: **significativo a 5% de probabilidade; ^{ns}não significativo.

Apesar de não ter sido observada uma boa relação entre a RP e o teor de argila neste estudo, Silva et al. (2008) revisando diversos estudos, mostram que, foi verificado experimentalmente uma boa relação entre esses parâmetros.

A relação entre a RP na camada compactada fixada (20 a 30 cm) e a REs, não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$) em todas as combinações realizadas.

Tabela 4 - Correlação entre a resistência à penetração em camada fixa compactada (RP 20-30 cm-1) e resistividade (RES 0-15; 0-30 e 0-90 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), p-valor (p) e número de amostras (n).

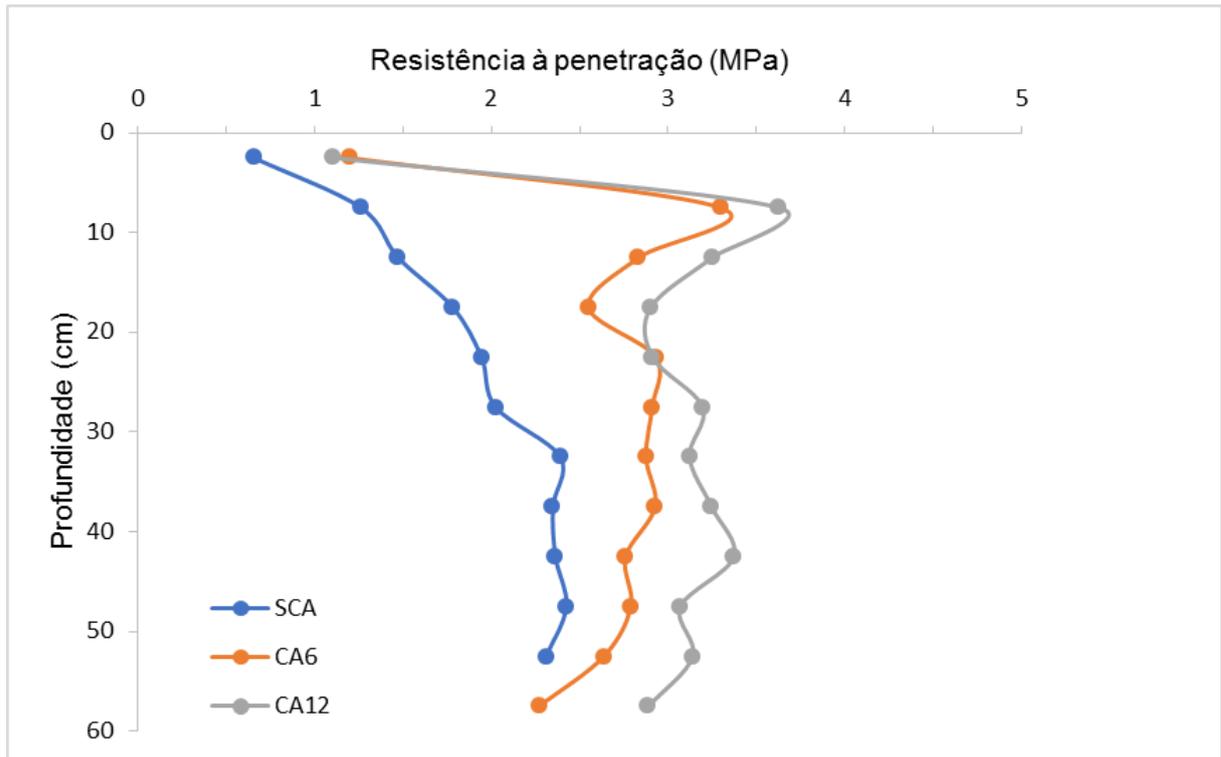
Saída	Entrada	R ²	r	p	n
RP 20-30	RES 0-15	0,120	0,346 ^{ns}	0,189	16
RP 20-30	RES 0-30	0,015	0,121 ^{ns}	0,644	17
RP 20-30	RES 0-50	0,040	0,002 ^{ns}	0,426	18
RP 20-30	RES 0-90	0,001	0,015 ^{ns}	0,954	18

Legenda: ^{ns}não significativo.

Para a relação da camada compactada variável e a REs, todos os valores obtidos não foram estatisticamente significativos ($p > 0,05$).

A Figura 11 mostra um gráfico com a média global dos dados processados de RP dos três blocos e três faixas de compactação.

Figura 11 - Gráfico com média global de RP



Fonte: Do autor (2022).

Na (Tabela 5) podemos observar a relação entre a RP e os valores de REs encontrados na camada compactada fixada de 20-30. Nessa tabela não foi encontrada nenhuma relação em que o p-valor obtido foi menor que 0,05.

Tabela 5 - Correlação entre a resistência à penetração em camada compactada variável (RP 0-15; 0-30; 0-50 e 0-90 cm-1) e resistividade (RES 0-15; 0-30 e 0-90 cm-1) em diferentes profundidades do solo, coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação r , p-valor (p) e número de amostras (n).

Saída	Entrada	R^2	r	p	n
RP 0-15	RES 0-15	0,093	0,305 ^{ns}	0,251	16
RP 0-30	RES 0-30	0,065	0,254 ^{ns}	0,342	16
RP 0-50	RES 0-50	0,052	0,227 ^{ns}	0,366	18
RP 0-90	RES 0-90	0,000	0,015 ^{ns}	0,953	18
RP 0-15	RES 0-15	0,089	0,298 ^{ns}	0,262	16
RP 0-30	RES 0-30	0,006	0,078 ^{ns}	0,765	17
RP 0-50	RES 0-50	0,001	0,032 ^{ns}	0,900	18
RP 0-90	RES 0-90	0,025	0,157 ^{ns}	0,534	18
RP 0-15	RES 0-15	0,100	0,317 ^{ns}	0,231	16
RP 0-30	RES 0-30	0,006	0,078 ^{ns}	0,766	17
RP 0-50	RES 0-50	0,000	0,014 ^{ns}	0,957	18
RP 0-90	RES 0-90	0,021	0,144 ^{ns}	0,569	18

Legenda: ^{ns}não significativo.

De acordo o estudo realizado por Silva et al. (2009) em Latossolo vermelho distrófico típico foi encontrado na profundidade de 0-20 cm (camada mais compactada) em sistema de PD maiores valores de RP. De acordo com esses autores, isso se deve ao fato do não revolvimento do solo por 15 anos. No presente estudo a camada mais compactada está localizada superficialmente (0 a 15 cm) para o CA6 CA12. Já no controle (SCA) a camada compactada foi encontrada a partir de 30 cm de profundidade.

Os maiores valores de θ foram observados na profundidade de 50 cm, no tratamento controle (SCA), o qual também apresentou menor RP em relação aos demais tratamentos. De acordo com Beutler & Centurion (2003) a θ é um fator controlador da compactação, muitos casos o preparo do solo é realizado sem levar em conta sua umidade.

7. CONCLUSÃO

Nas condições em que foi realizado o estudo, há uma baixa relação entre os parâmetros avaliados (θ , Res, teor de argila) e RP.

A camada com maior resistência à penetração está na profundidade de 0 a 30 cm.

Há uma baixa relação entre a camada (20-30), com a REs

Não é possível diagnosticar uma possível compactação do solo utilizando parâmetros alternativos, como a resistividade elétrica.

8. REFERÊNCIAS

- ANDREOLA, F.; COSTA, L.M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.857-865, 2000.
Apostila de Física do solo, USP, LSN. p310
- BEUTLER, N.A & CENTURION JF (2003) Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38:849-856.
- BORGES, WR. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado pelo IAG / USP. 2007. 260 f . Diss. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BÜNEMANN, E.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; et al., ; Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018.
- CALAMITA, G.; BROCCA, L.; PERRONE, A.; PISCITELLI, S.; LAPENNA, V.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *Journal of Hydrology*, v. 454–455, p. 101–112, 2012.
- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p
- Cavaliere, K. M. V.; Silva, A. P. da; Arvidsson, J.;Tormena, C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um cambissolo háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.477-485, 2009.
- DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G. & FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. *Ciência Agrotec.*, Lavras, v.31, n.6, p. 1862-1866, 2007.
- DE OLIVEIRA, Y. M. M. et al. Pesquisa e inovação agropecuária na agenda 2030: contribuições da Embrapa e parceiros. 2018.
- EMBRAPA, 1997. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Visão 2030: O Futuro da Agricultura Brasileira. Brasília: Embrapa. 2018. 212p.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.
- FAO. “Climate-smart” agriculture: policies, practices and financing for food security, adaptation and mitigation. Rome: FAO, 2015. The document was prepared as a technical input for the Hague Conference on Agriculture, Food Security and Climate Change, to be held 31 October to 5 November 2010.
- FERNANDES, R., **Desenvolvimento De Correlação Entre Os Ensaios Dcp E ISC Estudo De Caso: Pista De Testes**, Ufsc-Joinville, 81p, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS DE QUALIDADE DE SOLO DE INTERESSE AGRÍCOLA. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, 2006.

JAYAWICKREME, D.H.; DAM, R.L.V.; HYNDMAN, D.W. Hydrological consequences of land-cover change: quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity. *Geophysics*, v. 75, n. 4. p. WA43–WA50, 2010. DOI:

KIEHL, E.J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KLUTHCOUSKI, J. Efeito de manejo em alguns atributos de um Latossolo Roxo sob cerrado e nas características produtivas de milho, soja, arroz e feijão, após oito anos de plantio direto. Piracicaba: Esalq, 1998. 179 p. Tese de Doutorado.

LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, v.37, p.1166-1169, 2007.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

MARANHÃO, C. H. M. **Análise da influência da heterogeneidade da resistividade do solo em sistemas de aterramentos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2008.

MELO, L.B.B.; SILVA, B.M.; PEIXOTO, D.S.; CHIARINI, T.P.A.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, N. Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 208, 104876, 2021.

MOLIN, José P., Dias, Carlos T. dos S. e Carbonera, Lucelha. Estudos com penetrometria: novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]. 2012, v. 16, n. 5 [Acessado 3 Setembro 2022] , pp. 584-590.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da. Correção da resistência à penetração em função do conteúdo de água em um latossolo vermelho.

PAULO, Resistência a penetração na avaliação da compactação em latossolo cultivado com grãos sob plantio direto (2022), TCC, graduação.

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.

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**, v. 53, p. 433–439, 1989.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-343, 2005.

ROSOLEM, C. A et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** [online]. 1999, v. 34, n. 5, pp. 821-828.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2005. DOI: 10.1016/j.still.2004.10.004

SANTI, A. L. et al. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 8, n. 3, p. 510–515, 2013.

SILVA, ÁLVARO PIRES da et al. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online]. 2008, v. 32, n. 1 [Acessado 8 Setembro 2022] , pp. 1-10.

SILVA, José et al. Análise espacial da densidade, umidade e resistência mecânica do solo à penetração sob sistemas de cultivo. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 6, n. 3, 2009.

STOLF, R.; MURAKAMI, J.H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L.G. ; SILVA, L. C. F. ; MARGARIDO, L.A.C. . Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 774-782, 2014.

STOLF, Rubismar et al. Penetrômetro de impacto stolf-programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista brasileira de ciência do Solo**, v. 38, p. 774-782, 2014.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um latossolo vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1817-1825, 2008.

VIANA, F. M. **Interpretação da resistividade aparente do solo e estratificação com arranjo de Schlumberger**. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e da computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

Zhang, S., Richart, N. & Beyer, K. Numerical evaluation of test setups for determining the shear strength of masonry. *Mater Struct* **51**, 110 (2018).