



**THAYNÁ PEREIRA AZEVEDO CHIARINI**

**SUBSOLAGEM E ESCARIFICAÇÃO EM PLANTIO  
DIRETO: EFEITOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E  
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

**LAVRAS-MG**

**2022**

**THAYNÁ PEREIRA AZEVEDO CHIARINI**

**SUBSOLAGEM E ESCARIFICAÇÃO EM PLANTIO  
DIRETO: EFEITOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E  
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal  
de Lavras, como parte das exigências  
do curso de Agronomia, para a  
obtenção do título de Bacharel em  
Agronomia.

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Orientador

Me. Lázaro Longue Mosa

Coorientador

**LAVRAS-MG**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica durante a condução do projeto.

À Fazenda Santa Helena, grupo G7 Empreendimentos, pela disponibilização da área para implantação do experimento e demais recursos para realização do mesmo.

Ao professor Bruno Montoani Silva por ter me acolhido e confiado a mim inúmeras oportunidades de desenvolvimento profissional. Agradeço pela orientação, paciência, apoio e confiança durante os anos que trabalhamos juntos.

À toda equipe da Física do Solo, especialmente, Brunno Araújo, Devison Peixoto, Laura Melo, Lázaro Mosa, Lucas Castro, Monna Lysa Santana, Pedro Benevenuto e Raphael Passaglia, e aos técnicos do DCS, Dulce e Doroteo, por toda ajuda nos trabalhos de campo e análises laboratoriais, pela boa convivência, pelos ensinamentos compartilhados e amizades construídas.

Ao professor Silvino Guimarães Moreira e ao grupo GMAP pela confiança, acolhimento, aprendizado compartilhado e amizades construídas. Sem dúvidas foram experiências únicas que agregaram e muito em minha vida profissional.

A Deus por ter preparado meu caminho e me sustentado até aqui. À Nossa Senhora por passar na frente e se encarregar que tudo se encaixasse perfeitamente e acontecesse no momento certo.

À minha família que sempre me apoiou e nunca mediu esforços para que eu realizasse meus sonhos, minha mãe Helen, minha avó Zilda, minha irmã Brisa, meu avô Joaquim, meu pai Marcelo e meu pai Robson. Obrigada por tudo!

As minhas companheiras de casa, Marina e Izabel, com vocês com certeza esses anos foram muito mais leves e divertidos! Obrigada por cada café, conversas no chão do corredor, lágrimas e alegrias compartilhadas!

Aos meus amigos, Brunno, Carol, Laura e Mary, por sempre se fazerem presentes, serem cuidado e carinho em todos os momentos.

Ao Luiz Gustavo por todo amor, companheirismo e apoio, principalmente nessa fase final do trabalho.

## RESUMO

Áreas sob sistema plantio direto (SPD) podem apresentar problemas de compactação do solo com conseqüente redução de produtividade dos cultivos. Uma estratégia para mitigar a compactação é a adoção do preparo ocasional utilizando escarificação ou subsolagem. Visto que esses preparos ferem um dos princípios do SPD, deve-se realizar adequado diagnóstico da compactação para tomada de decisão quanto a realização do manejo. Indicadores físicos como densidade do solo ( $D_s$ ), porosidade total ( $P_t$ ) e resistência à penetração ( $R_p$ ) são acurados para o referido diagnóstico. Ainda, avaliação da resistividade elétrica do solo ( $\rho$ ) pode auxiliar na identificação de camadas compactadas, pois, mudanças na estrutura do solo alteram suas propriedades elétricas. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do preparo ocasional por meio de indicadores físicos e seu reflexo na produtividade dos cultivos da safra 2019/20. O experimento foi implantado em 2015 na Fazenda Santa Helena (Nazareno-MG), em um Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa, sendo os tratamentos: SPDC: SPD contínuo (14 anos); SPDE: SPD escarificado com Stara Fox® em 2015; SPDSI2: SPD subsolado (Ikeda®) a cada 2 anos; SPDSI3: SPD subsolado (Ikeda®) a cada 3 anos; SPDSI+C: SPD subsolado (Ikeda®) em 2015 + aplicação 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície; SPDSK+C: SPD subsolado (Kamaq®) em 2015 + aplicação 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário em profundidade. A linha de rodado do pulverizador foi adotada como condição de referência de compactação do solo. As coletas e avaliações físicas foram realizadas em novembro/2019, sendo obtidos mapas 2D de  $R_p$  e  $\rho$  por modelagem inversa dos dados. A  $R_p$  foi maior para camadas abaixo de 0,20 m do solo para os tratamentos SPDSI+C e SPDSK+C. A  $\rho$  foi eficiente para a identificação da área sob influência do rodado e das linhas de plantio da cultura. Porém, a umidade do solo ( $\theta$ ) no momento da avaliação se encontrava próxima a capacidade de campo, impossibilitando a distinção dos tratamentos pela  $\rho$  e dificultando a identificação do rodado pela  $R_p$ . Devido à alta influência da  $\theta$ , sugere-se a avaliação em condição de  $\theta$  menor. A  $D_s$  e  $R_p$  se mostraram maiores e a  $P_t$  menor para SPDSK+C e SPDSI+C, condicionando piores condições físicas para estes manejos. Entretanto, as produtividades das culturas foram maiores em SPDSI+C, devido ao seu melhor condicionamento químico, mostrando que um solo identificado como compactado por atributos físicos não é necessariamente restritivo ao desenvolvimento das culturas, e mais estudos são necessários para conclusão quanto a tomada de decisão de uso de preparo ocasional.

**Palavras-chave:** Compactação do solo. Preparo ocasional. Atributos físicos do solo.

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	5
1.1 Área experimental.....	5
2.2 Tratamentos .....	6
2.3 Amostragem e avaliações .....	8
2.3.1 Propriedades físicas do solo avaliadas em laboratório.....	8
2.3.2 Propriedades físicas do solo avaliadas em campo.....	9
2.3.3 Propriedades químicas do solo .....	10
2.3.4 Produtividade das culturas .....	10
2.3.5 Análise estatística.....	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	11
3.1 Propriedades físicas do solo avaliadas em laboratório .....	11
3.2 Resistência do solo à penetração em campo .....	15
3.2.1 Mapas 2D de resistência à penetração em campo .....	17
3.3 Resistividade elétrica do solo .....	19
3.4 Propriedades químicas do solo .....	21
3.5 Produtividade das culturas .....	23
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	25
REFERÊNCIAS .....	27

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) implantado no Brasil em 1972, em 2022 soma mais de 36 milhões de hectares de produção no país (FEBRAPDP, 2021). O seu crescimento exponencial é sobretudo em áreas de produção de culturas anuais e seu grande sucesso é devido aos inúmeros benefícios que proporciona ao sistema de produção agrícola atrelado à sustentabilidade.

O SPD é fundamentado em três princípios: o não revolvimento do solo, a cobertura permanente do solo e a diversificação de plantas na rotação de cultivos. Esses pilares proporcionam benefícios como, aumento no teor de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo (DEVINE et al., 2014) e da atividade microbiana (ZHANG et al., 2015); economia de combustíveis fósseis por reduzir a entrada de maquinários na área (YADAV et al., 2020) e consequente redução no custo de produção; redução da erosão (KUROTHE et al., 2014), melhorias em atributos do solo como agregação e estabilidade dos agregados do solo, porosidade e maior capacidade de infiltração, retenção e disponibilidade de água (LAL; REICOSKY; HANSON, 2007; DERPSCH et al., 2010; BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018; KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2019).

Mesmo o SPD apresentando diversas vantagens, é possível observar redução na produtividade das culturas relacionada a problemas com compactação do solo. Isso vem ocorrendo sobretudo em áreas estabelecidas a longo tempo sob o sistema (NUNES et al., 2015; POTT et al., 2019; SCHLÜTER et al., 2018), devido a fatores como o intenso tráfego de operações mecanizadas realizadas ao longo dos anos agrícolas, sobretudo em condições inadequadas de umidade do solo; ao preparo inadequado do solo na implantação do SPD; ao não uso ou manejo incorreto de plantas de cobertura, e a baixa diversidade de culturas, que resultam em baixa produção de palhada e de acúmulo de matéria orgânica no solo (MOREIRA, 2019).

A compactação do solo ocorre quando as pressões exercidas sobre o solo superam a capacidade de suporte de carga, fazendo-o perder suas propriedades estruturais (DIAS JUNIOR; TASSINARI, 2018). Caracteriza-se pela redução do volume de poros e consequente aumento da densidade do solo (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008) e da resistência à penetração, e redução principalmente dos macroporos. Assim, a compactação restringe o desenvolvimento radicular, a disponibilidade de ar, absorção de água e nutrientes pelas plantas, com consequente redução da produtividade das culturas

(HAMZA; ANDERSON, 2005). Em SPD, a compactação ocorre principalmente na camada entre 7 e 20 cm (REICHERT et al., 2009; NUNES et al., 2014, 2015), entretanto, pode ser mais profunda em função do histórico da área, sobretudo onde houve preparo inicial profundo.

Com o intuito de mitigar os problemas de compactação em SPD contínuo, produtores e pesquisadores têm estudado e adotado o preparo ocasional estratégico, (NUNES et al., 2014, BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO et al., 2020), que consiste no uso de implementos agrícolas, com capacidade de romper a camada compactada do solo, sendo os subsoladores e escarificadores os que apresentam maiores vantagens de utilização por apresentarem maiores profundidades efetivas de ação e promoverem menor erosão (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO et al., 2020) pelo não revolvimento de leivas do solo.

O escarificador é um equipamento de preparo do solo composto por hastes, que por romperem as camadas do solo sem a inversão da leiva, é menos agressivo à estrutura e com menor capacidade de reversão das camadas do solo, atuando na redução da compactação de forma mais localizada (CORTEZ et al., 2011). O subsolador também rompe camadas sem inverter a leiva, porém por suas hastes serem maiores é mais utilizado quando as camadas restritivas se encontram em maiores profundidades (>0,40 m) (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008).

Contudo, em revisão de literatura, Blanco-Canqui and Wortmann (2020) observaram que o preparo ocasional tem pouco efeito sobre as propriedades físicas do solo e na produtividade das culturas, com persistência dos efeitos menor que 2 anos. Já Peixoto et al. (2020), em meta análise concluíram que o preparo ocasional em SPD apresentou efeito positivo nas propriedades físicas do solo relacionadas à compactação, com persistência, geralmente maior que 2 anos, porém a prática não apresentou incremento em produtividades das culturas anuais de forma geral.

Como o uso de preparo estratégico confronta o princípio do SPD de não revolvimento do solo, reforça-se a importância do manejo adequado do mesmo, com rotação de culturas, uso de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo e com boa produção de palhada (NUNES et al., 2018). E ainda fazer uso de tráfego controlado de máquinas e em condições de umidade do solo com maior capacidade de suporte de carga (friável a mais seco) para reduzir os riscos de compactação do solo.

Assim, é necessário aprimorar os métodos de diagnóstico de compactação do solo em SPD, a fim de auxiliar o produtor na tomada de decisão quanto ao uso do preparo

ocasional, para ser efetuado somente quando as condições físicas do solo restringirem a produtividade das culturas (PEIXOTO et al., 2019a) e outras práticas conservacionistas não mitigarem o problema. Além disso, é importante o conhecimento da longevidade dos efeitos do preparo ocasional nos atributos físicos do solo e na produtividade das culturas, contribuindo para o entendimento da real necessidade e consequências de fazê-lo.

O diagnóstico de compactação do solo pode ser realizado quantitativamente por indicadores físicos, sendo os mais utilizados a densidade do solo, a porosidade e a resistência à penetração do solo.

A densidade do solo ( $D_s$ ) é um dos parâmetros mais utilizados para a determinação da compactação do solo, representando a relação entre a massa do solo seco e seu volume total (PANAYIOTOPOULOS; PAPADOPOULOU, 1994). O aumento da  $D_s$  significa o preenchimento dos espaços vazios do solo por partículas do mesmo, proporcionando uma correlação negativa entre o volume de poros e a  $D_s$  (BATISTA et al., 2019; NAWAZ; BOURRIÉ, 2013; SILVA et al., 2008). Apesar de haver registros de valores de densidade crítica ao desenvolvimento das culturas preestabelecidos (DE LIMA et al., 2007), para cada tipo de solo existe uma densidade crítica ao crescimento das plantas, como por exemplo 1,4 a 1,6  $Mg\ m^{-3}$  para solos argilosos e 1,6 a 1,8  $Mg\ m^{-3}$  para solos arenosos (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003), que é variável em função da estrutura, textura, mineralogia e da própria planta cultivada (HAKANSSON, 1990; HAKANSSON; LIPIEC, 2000; REICHERT et al., 2009).

A porosidade do solo ( $P_t$ ) é representada por espaços vazios do solo, que podem ser preenchidos por ar ou água. Há uma correlação negativa entre a  $P_t$  e a compactação, visto que quando a compactação do solo se intensifica, há uma acentuada redução no volume de poros, principalmente nos macroporos, que são destruídos com maior facilidade (KOOISTRA; TOVEY, 1994). A redução dos macroporos reduz a capacidade de aeração do solo, afetando significativamente o desenvolvimento das culturas. Portanto, a macroporosidade é um indicador importante da compactação, na qual valores abaixo de 0,10  $m^3\ m^{-3}$  estariam associados a uma redução do crescimento adequado das culturas por limitar a porosidade de aeração (HAKANSSON; LIPIEC, 2000; REICHERT et al., 2009; STOLF et al., 2011).

A resistência mecânica à penetração do solo ( $R_P$ ), simula a resistência que o solo fornece ao crescimento radicular. É amplamente utilizada devido a praticidade de se fazer em campo, ao baixo custo operacional (BECKETT et al., 2018; HARTGE et al., 1985;



HERRICK; JONES, 2002) e a correlação com propriedades da planta, como o crescimento das raízes (DEXTER, 1987; BUSSCHER & BAUER, 2003; OTTO et al., 2011). Há na literatura evidências de que valores de RP iguais ou maiores que 2 MPa, representam limitações ao desenvolvimento radicular (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). Segundo Freddi et al. (2007), RP entre 1,03 e 5,69 MPa alteram a morfologia do sistema radicular do milho, refletindo em queda de produtividade. Deve-se atentar que a RP sofre grande influência da condição de umidade do solo (REICHERT et al., 2009) e tende a diminuir exponencialmente no sentido em que a umidade aumenta (MOME FILHO et al., 2014).

A fim de padronizar as avaliações e amenizar estes efeitos, é indicado a realização das avaliações com o solo na capacidade de campo (MOME FILHO et al., 2014; VAZ et al., 2011). No entanto, Assis et al. (2009) discordaram, afirmando que a água diminui a capacidade de detectar possíveis diferenças nos resultados. Peixoto et al (2019b) propuseram uma metodologia de diagnóstico da compactação utilizando a RP, de forma a minimizar os efeitos que a umidade exerce sobre a mesma, realizando as avaliações com o solo mais seco que a capacidade de campo, evitando falsos negativos a compactação do solo.

Aliado a estes indicadores, métodos não invasivos como a tomografia de resistividade elétrica do solo, vem sendo sugeridos como sensíveis às mudanças nas condições estruturais do solo, como a compactação (BESSON et al., 2004; JEŘÁBEK; ZUMR; DOSTÁL, 2017).

A resistividade elétrica do solo ( $\rho$ ) é uma propriedade física que fornece a ideia da resistência do solo a passagem de corrente elétrica e depende das características e propriedades do solo como, textura e mineralogia, e grau de saturação, porosidade e densidade do solo (BECEGATO; FERREIRA, 2005; KOWALCZYK; MAŚLAKOWSKI; TUCHOLKA, 2014; SELADJI et al., 2010), propriedades estas variáveis de acordo com o grau de compactação. Portanto, mudanças nas condições físicas do solo promovidas pelo manejo podem alterar a  $\rho$ . Mais recentemente, estudos tem relacionado também a resistência a penetração com a resistividade (JEŘÁBEK; ZUMR; DOSTÁL, 2017; PICCOLI et al., 2019) para avaliar compactação do solo.

A  $\rho$  é influenciada negativamente pelo aumento do conteúdo de água no solo. Há uma correlação negativa entre a  $\rho$  e a  $D_s$ , sendo assim o monitoramento da  $D_s$  via  $\rho$  é

mais eficiente em solo seco. De forma contrária, há uma correlação positiva entre a  $\rho$  e a porosidade total, sobretudo em condições mais secas, visto a resistividade infinita do ar presente nos poros.

A compactação do solo é caracterizada pelo aumento da Ds e RP, e concomitante redução da porosidade, especialmente os macroporos. Logo, a compactação reduz a  $\rho$  pela redução da porosidade. Porém, tal interpretação depende do grau de saturação do solo (razão entre volume de água e o volume de poros). Em solo próximo da saturação (grau de saturação = 1), uma região mais porosa terá menor  $\rho$  que uma região menos porosa, pois os poros estarão saturados com água, reduzindo a  $\rho$ . De maneira geral a  $\rho$  não é utilizada como metodologia única para monitoramento da compactação, principalmente devido à grande variabilidade em função do grau de saturação.

Portanto, a interpretação da RES, assim como da RP, é muito dependente da condição de umidade do solo apresentando crescimento em sentidos contrários em função das variações do conteúdo de água, desta forma a combinação de testes de penetrometria aos testes de  $\rho$  podem proporcionar maior clareza no monitoramento da compactação (JEŘÁBEK; ZUMR; DOSTÁL, 2017; KELLER et al., 2017; KOWALCZYK; MAŚLAKOWSKI; TUCHOLKA, 2014; PICCOLI et al., 2019; ROMERO-RUIZ et al., 2018; SELADJI et al., 2010).

Estas avaliações, aliadas às respostas de produtividade das culturas, poderão ser utilizadas na tomada de decisão quanto à necessidade de uso do preparo ocasional em SPD. Nesse contexto, os objetivos deste trabalho foram: avaliar os efeitos de subsoladores e escarificador no alívio da compactação do solo em áreas consolidadas de SPD, por meio de atributos físicos indicadores de compactação (Ds, Pt e RP) após 4 anos de implantação do experimento (2019); avaliar o uso do método não invasivo de resistividade elétrica do solo para identificar compactação e os efeitos do preparo ocasional do solo; e avaliar a produtividade de grãos em sistema plantio direto contínuo submetido a preparo ocasional.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **1.1 Área experimental**

O experimento foi instalado na safra de 2015/2016 na Fazenda Santa Helena (21° 15' 39" S e 44° 31' 04" W), localizada em Nazareno/MG. O clima é do tipo Cwa (classificação de Köppen), com invernos secos e verões quentes e úmidos, com precipitação e temperatura médias anuais de 1300 mm e 19,7 °C, respectivamente. O solo

da área experimental é um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico de textura argilosa, com média de distribuição de argila, silte e areia de 530, 250 e 220 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, ao longo do perfil do solo.

Na área onde o estudo foi conduzido, o sistema plantio direto foi implantado em 2005, as recomendações de correção de solo e adubação foram realizadas com base na análise de solo e nas quantidades de nutrientes exportados por cada cultura. Todo manejo da área, incluindo estes citados de correção e adubação do solo, os tratos culturais e a escolha das culturas ao longo dos anos agrícolas foram definidos e realizados pela própria Fazenda.

O sistema de cultivo consiste na rotação soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e milho (*Zea mays* L.) na safra e trigo (*Triticum aestivum* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) na segunda safra. Em anos de condições pluviométricas favoráveis, após a colheita da safra outono-inverno, faz-se o cultivo de planta de cobertura com aveia preta para cobertura do solo e produção de palhada.

Tabela 1 - Histórico de cultivos na área experimental desde a implantação do experimento.

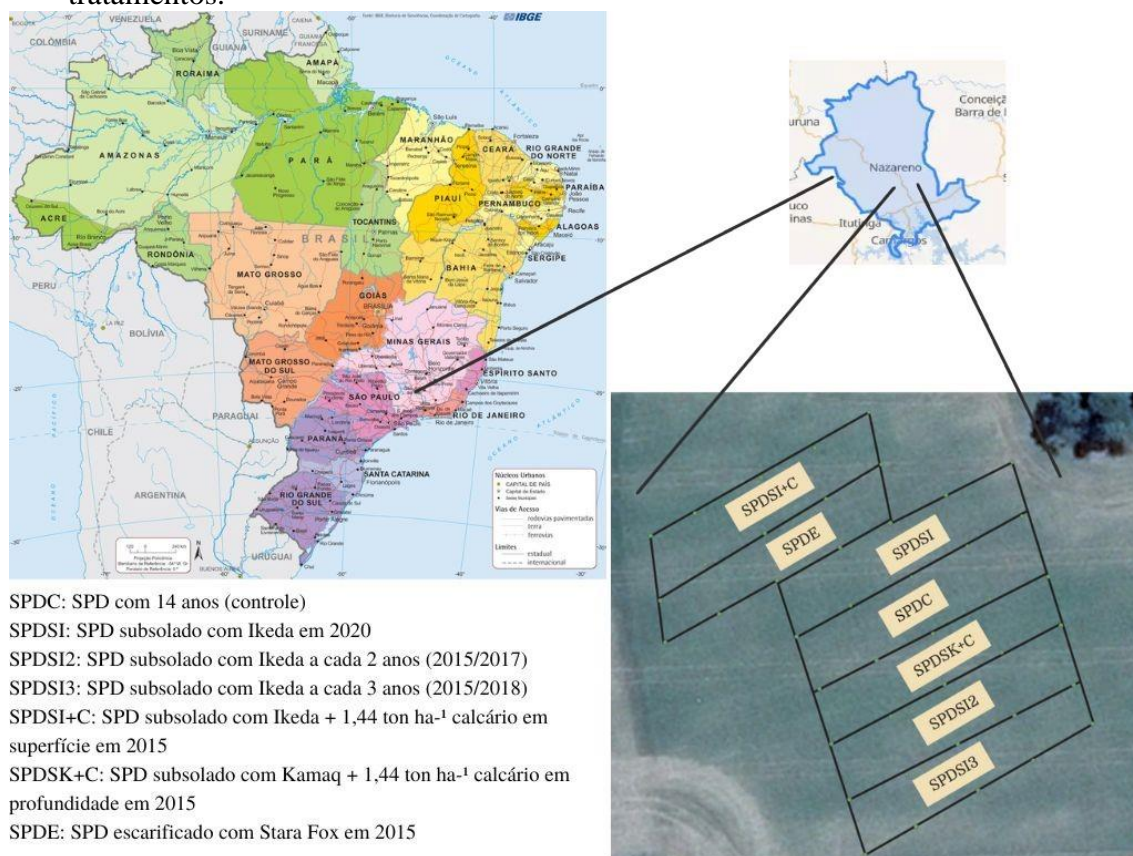
Safra	15/16	16	16/17	17	17/18	18	18/19	19	19/20	20	20/21
Cultura	Soja	Trigo	Milho	Feijão	Soja	Trigo	Milho	Feijão	Milho	Feijão	Soja

## 2.2 Tratamentos

O experimento foi implantado em faixas, com 7 tratamentos e 4 repetições. As faixas continham 18 m de largura e 80 m de comprimento, sendo subdivididas em 4 parcelas de 360 m<sup>2</sup>. Os tratamentos consistiram de diferentes métodos de preparo do solo visando melhoria estrutural e condicionamento físico ou físico-químico, sendo eles: SPDC, sistema plantio direto contínuo implantado em 2005 (controle); SPDSI2, SPD subsolado com Ikeda® a cada 2 anos (2015/2017/2020); SPDSI3, SPD subsolado com Ikeda® a cada 3 anos (2015/2018); SPDSI+C, SPD subsolado com Ikeda® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário (Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) = 180%), além da aplicação recomendada pela análise de solo, em superfície; SPDSK+C, SPD subsolado com subsolador adubador Kamaq® em 2015 + 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário incorporado na profundidade entre 0,40 e 0,6 m (PRNT = 180%), além da aplicação recomendada pela análise de solo; SPDE, SPD escarificado com Stara Fox® até 0,26 m

de profundidade em 2015; e SPDSI1, SPD subsolado com Ikeda® após 15 anos de implantação, instalado em 2020 (Figura 1).

Figura 1 - Área experimental localizada na fazenda Santa Helena com os respectivos tratamentos.



Fonte: Guia geográfico, 2022.

O implemento Stara Fox® é um escarificador que atinge cerca de 0,26 m de profundidade no solo. O Kamaq® é um subsolador adubador que apresenta ponteira do tipo cunha (convencional) e aplica insumo em profundidade, de 0,40 a 0,60 m do solo. Já o Ikeda® é um subsolador com ponteira do tipo alada, mais robusta e agressiva ao solo que a convencional, atingindo profundidades acima de 0,40 m do solo.

Devido ao operacional da Fazenda, o SI2 que seria subsolado a cada 2 anos, teve sua terceira subsolagem feita em 2020, ou seja, três anos após a segunda, realizada em 2017. Considerou-se a linha do rodado do pulverizador da Fazenda como condição de referência de maior compactação do solo. O pulverizador é autopropelido, John Deere 4630 com peso de chassi de 7.983 kg, capacidade do reservatório de 2.270 L e bitola de 2,3 a 3,0 m.

## 2.3 Amostragem e avaliações

As avaliações em campo da resistência do solo à penetração (RP), tomografia de resistividade elétrica do solo e as coletas dos cilindros para análises físicas em laboratório foram realizadas em novembro, no início da primeira safra do ano agrícola 2019/2020.

### 2.3.1 Propriedades físicas do solo avaliadas em laboratório

Para determinação da porosidade total (Pt), macroporosidade (Mac), resistência a penetração do solo em laboratório (RP<sub>100</sub>) e densidade do solo (Ds), foram coletados anéis volumétricos com dimensões de 0,06 x 0,025 m (diâmetro e altura) nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,40-0,50 m para cada parcela experimental em dois pontos ao longo do transecto: na linha do rodado e na entrelinha do rodado do pulverizador. As profundidades de avaliação foram determinadas em função de se conhecer até que profundidade a estrutura do solo recebeu alteração após os preparos realizados em cada tratamento, em relação a área diagnosticada e definida como compactada (linha do rodado). Em cada camada foram coletadas 3 amostras indeformadas para cada parcela.

Em laboratório, as amostras foram preparadas removendo-se o excesso de solo de forma que o mesmo ficasse alinhado ao nível do anel e, posteriormente, foram colocadas em bandejas com água para saturação por capilaridade. Ao atingirem a saturação, os cilindros foram pesados e submetidos ao potencial matricial de -0,006 MPa em funis de vidro de Buchner.

As amostras foram pesadas após atingirem o equilíbrio em cada potencial matricial que eram submetidas, passando pelos potenciais seguindo a sequência: -0,006, -0,01, -0,10, -0,50 e -1,50 MPa. Nos três últimos potenciais, utilizou-se os extratores de Richards (Klute, 1986). Ao final, as amostras foram secas em estufa a 105-110 °C, por 24 h, e pesadas para quantificação do conteúdo de água e Ds.

Ao atingirem o equilíbrio no potencial -0,10 MPa, as amostras foram submetidas ao teste de resistência à penetração com penetrógrafo digital de bancada Marconi, modelo MA 933, ponteira tipo cone circular reto, de 45° e 3,84 mm de diâmetro, e velocidade constante de 100 mm min<sup>-1</sup>.

A densidade do solo foi calculada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2011), utilizando a equação:

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

Sendo:

Ds - Densidade do solo (kg dm<sup>-3</sup>);

$M_s$  - massa de solo seco a 105 °C (kg), determinada por: ( $M_s$  = peso conjunto seco – peso do cilindro – peso pano seco – peso látex);

$V$  - volume total de solo ( $\text{dm}^3$ ), definido por: ( $\pi * r^2 * h$ ); sendo  $\pi = 3,14$ , o raio ( $r$ ) e a altura ( $h$ ) em (cm).

A porosidade total ( $P_t$ ) foi determinada pela fórmula:

$$P_t = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s \times D_s}$$

Sendo:

$M_{sat}$  – Massa da amostra saturada (kg);

A microporosidade ( $Mic$ ):

$$Mic = \frac{[(P_{6kPa} - P_{cil} - P_{p6kPa} - Ltx) - M_s]}{V}$$

Onde:

$P_{6kPa}$  - Peso da amostra no potencial de -6 kPa;

$P_{p6kPa}$  - Peso do pano no potencial de -6 kPa;

$Ltx$  – látex.

E por fim, a macroporosidade ( $Mac$ ) foi determinada por:

$$Mac = P_t - micro$$

### 2.3.2 Propriedades físicas do solo avaliadas em campo

As avaliações de RP e resistividade elétrica do solo (RES) em campo foram feitas ao longo de um transecto, transversal à faixa do tratamento e da linha do rodado do pulverizador, e com umidade do solo próxima a capacidade de campo (CC). Para a RP utilizou-se um penetrômetro dinâmico de impacto (modelo IAA/Planalsucar-Stolf) de ponta cônica com ângulo de 30° e diâmetro basal 1,28 cm marca Kamaq®. Os testes e cálculos foram realizados conforme descrito por Stolf et al. (2014). O transecto possuía 8,0 m de comprimento ao longo do qual foram realizadas 17 medidas, em intervalo espacial regular, na profundidade de 0-0,6 m e espaçamento entre elas de 0,5 m, acompanhando as linhas de plantio.

A RES foi determinada com resistímetro marca Alta Energia modelo X5xtal 250 com arranjo de eletrodos dipolo-dipolo, espaçamento entre eletrodos de 0,24 m, totalizando 306 medidas por transecto até a profundidade de 0,80 m. A partir dos dados

de campo de potencial elétrico do solo (V) e intensidade de corrente aplicada (I) foi calculada a resistividade elétrica aparente ( $\rho_a$ ), conforme equação abaixo:

$$\rho_a = K * \left(\frac{\Delta V}{I}\right)$$

onde  $\rho_a$  é a resistividade elétrica aparente; K é o coeficiente geométrico, que para o arranjo dipolo-dipolo é expresso como:  $\pi n(n + 1)(n + 2)a$ , sendo  $n$  o nível e  $a$  o espaçamento entre eletrodos;  $\Delta V$  é a diferença de potencial elétrico gerado pela aplicação de uma corrente  $I$ . A determinação e os cálculos seguiram os procedimentos descritos por Samouelian et al. (2005).

### **2.3.3 Propriedades químicas do solo**

Ao final da safra de verão 2019/2020 a análise química do solo foi realizada. Para tal, foram coletadas 5 amostras simples com trado holandês em 4 profundidades (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) que fizeram parte de uma amostra composta. Em cada faixa foram coletadas 4 amostras compostas, correspondendo a 4 repetições para avaliação de fertilidade do solo.

Os indicadores de fertilidade do solo avaliados foram: teores de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), pH em CaCl, saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e matéria orgânica do solo (M.O.).

### **2.3.4 Produtividade das culturas**

Para a safra 2019/20 a colheita foi realizada em todos os tratamentos com exceção do SII (subsulado com Ikeda® após 15 anos de implantação do SPD), pois ainda não havia sido implementado, tornando o tratamento uma duplicata até então do tratamento controle (SPDC).

Para realizar a estimativa de produtividade das culturas, determinou-se como área útil de colheita 3 linhas de 5 metros para as culturas milho e feijão, em cada parcela experimental. A produtividade foi corrigida para umidade de grãos de 13%.

### **2.3.5 Análise estatística**

Os dados de fertilidade do solo, atributos físicos determinados em laboratório e as produtividades das culturas foram submetidos a análise de variância, em delineamento inteiramente casualizado, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, no programa Sisvar®, versão 5.8.

Para RP, os 17 pontos de determinação ao longo do transecto foram utilizados como repetições na análise de variância e os respectivos intervalos de confiança das médias foram determinados no programa RStudio®. Os mapas 2D de RP foram obtidos através de interpolação dos dados por triangulação linear com o software Surfer® versão 13.

A pa foi utilizada para o procedimento de inversão de dados no programa Res2DInv®. Após a inversão, os dados foram interpolados pelo procedimento de triangulação linear utilizando o programa Surfer® versão 13, obtendo-se mapas 2D de resistividade elétrica do solo.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

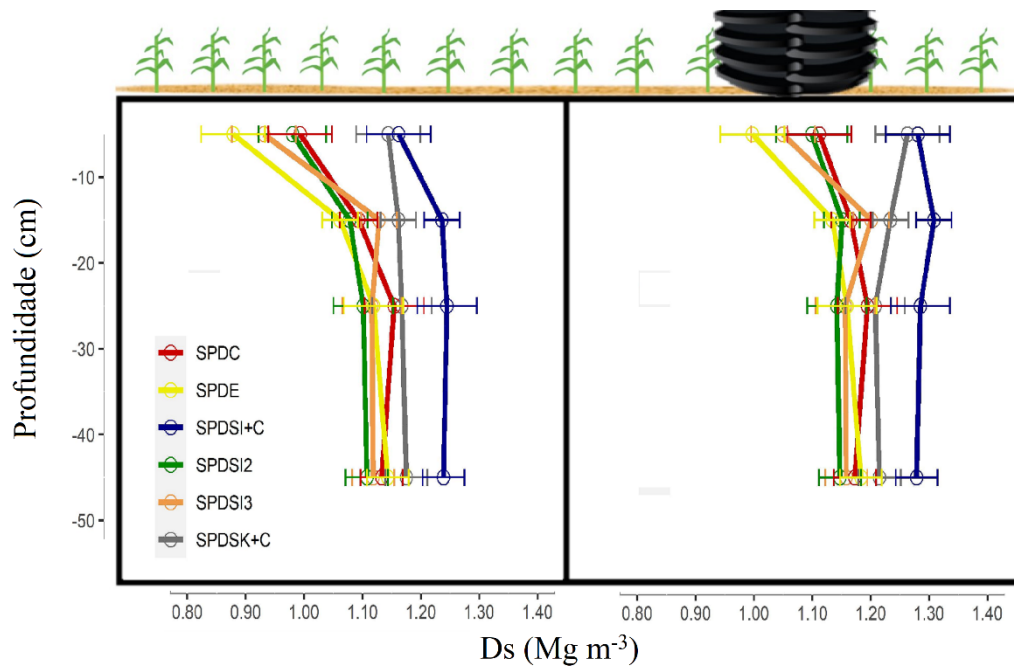
#### **3.1 Propriedades físicas do solo avaliadas em laboratório**

As propriedades físicas do solo ( $D_s$ ,  $RP_{100}$ , Pt e Mac) para as áreas entre rodado (ER) e rodado do pulverizador autopropelido (R), em cada tratamento, estão apresentadas nas Figuras 2, 3 e 4. A comparação entre os tratamentos de manejo do solo para cada propriedade física foi feita apenas para a área ER. A comparação entre ER e R foi feita sem distinção de tratamentos, ou seja, considerando a média de todos os tratamentos em cada profundidade do solo.

De maneira geral, a  $D_s$  e a  $RP_{100}$  foram maiores e Pt e Mac foram menores no R que no ER, em todas as profundidades avaliadas. Este resultado comprova o efeito negativo do tráfego de máquinas pesadas nas propriedades físicas do solo, porém, como o pulverizador trafega sempre no mesmo local, caracteriza como tráfego controlado para esse maquinário, limitando o efeito sobre as culturas. As diferenças de  $D_s$  entre tratamentos são mais evidentes na camada superficial do solo (0–0,20 m) e se tornam menos expressivas abaixo dela, tanto para ER quanto para R (Figura 2).

Figura 2 - Médias de densidade do solo ( $D_s$ ) e seus respectivos intervalos de confiança (Tukey  $p < 0,05$ ) para os manejos de solo, no entre rodado (ER), à esquerda, e rodado (R), à direita, de um pulverizador autopropelido, em quatro profundidades.

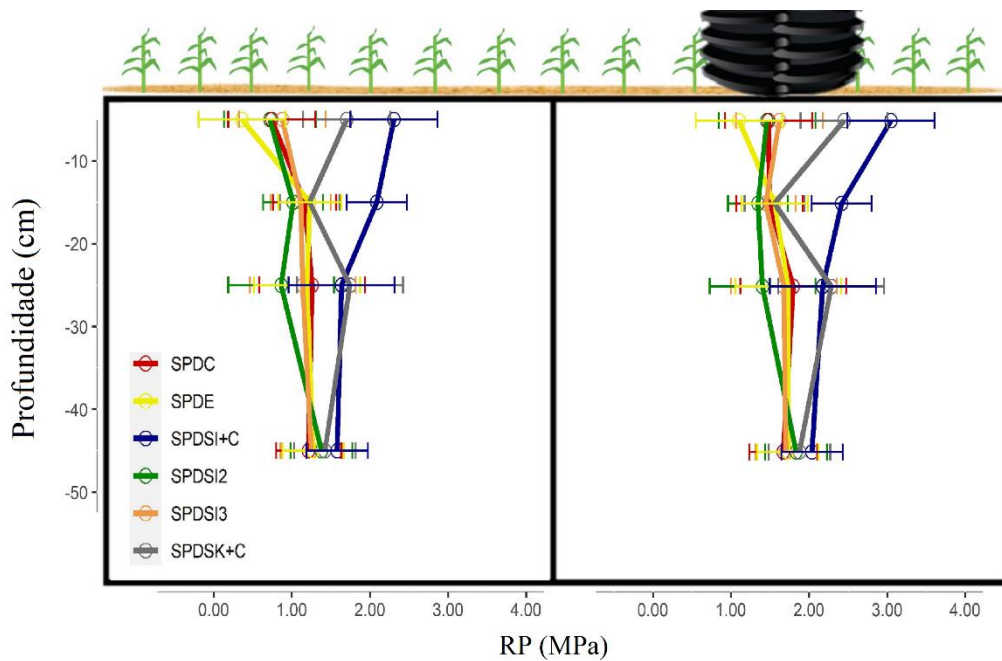




No ER, na profundidade de 0–0,10 m, os tratamentos que apresentaram menores Ds foram SPDE ( $0,87 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e SI3 ( $0,91 \text{ Mg m}^{-3}$ ) em relação aos subsolados em 2015. Em 0,20 m o manejo subsolado com Ikeda® em 2015 (SI+C), apresentou a maior Ds,  $1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ . Para a profundidade de 0,40-0,60 m, os mesmos subsolados em 2015 apresentaram as maiores Ds, não diferindo entre si, apresentando SK+C,  $1,18$  e SI+C,  $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ .

Na Figura 3 estão representadas as médias de RP para cada manejo de solo. O SI+C apresentou maior RP ( $1,61 \text{ MPa}$ ) em relação ao SPDE ( $1,04 \text{ MPa}$ ) e SI3 ( $1,08 \text{ MPa}$ ) na profundidade de 0–0,10 m.

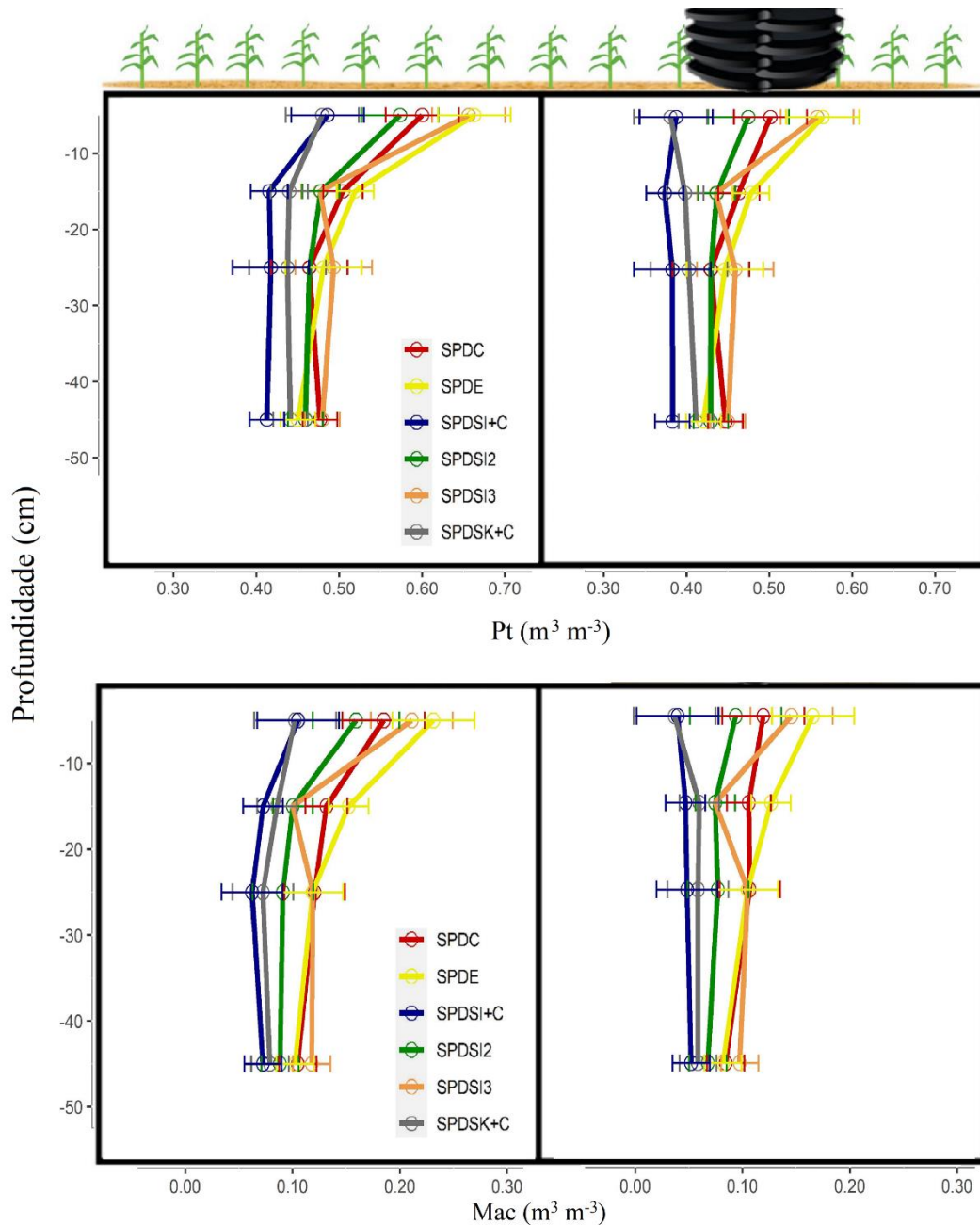
Figura 3 - Médias de resistência a penetração ( $RP_{100}$ ) e seus respectivos intervalos de confiança (Tukey  $p < 0,05$ ) para os manejos do solo, no entre rodado (ER) e rodado (R) de um pulverizador autopropelido, em quatro profundidades.



Estes resultados indicam que ocorreu uma reconsolidação intensa do solo após 4 anos do preparo ocasional com subsolagem quando comparado a operação de escarificação. Apesar do SPDE não diferir do controle, em relação ao subsolador o escarificador apresenta menor mobilização do solo, fazendo com que a capacidade de suporte de carga do solo não seja tão afetada pelo seu uso (VEIGA et al., 2007; REICHERT et al., 2017) e a reconsolidação do solo seja mais lenta, proporcionando um alívio estrutural do solo mais persistente em relação ao manejo subsolado. Ainda, com 1 ano de subsolagem o solo já se encontra similar a condição física inicial, devido ao SI3 não diferir do SPDC em nenhuma profundidade de RP e Ds avaliada.

Na Figura 4, observa-se que o SK+C apresentou a menor Pt ( $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) em relação ao tratamento controle na camada de 0-0,10 m, bem como o SI+C nas profundidades 0,20 m e 0,40-0,60 m, apresentando Pt de  $0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente. Assim como na Ds e RP, a Pt em 0-0,20 m o SPDE não diferiu do SPDC, diferindo apenas dos manejos subsolados em 2015, com maiores valores de Pt (média  $0,60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), estando em conformidade com o discutido na Ds e RP, onde o manejo escarificado apresenta alívio estrutural mais persistente que o subsolado.

Figura 4 - Médias de porosidade total (Pt) e macroporosidade (Mac) e seus respectivos intervalos de confiança (Tukey  $p < 0,05$ ) para os manejos do solo, no entre rodado (ER) e rodado (R) de um pulverizador autopropelido, em quatro profundidades.



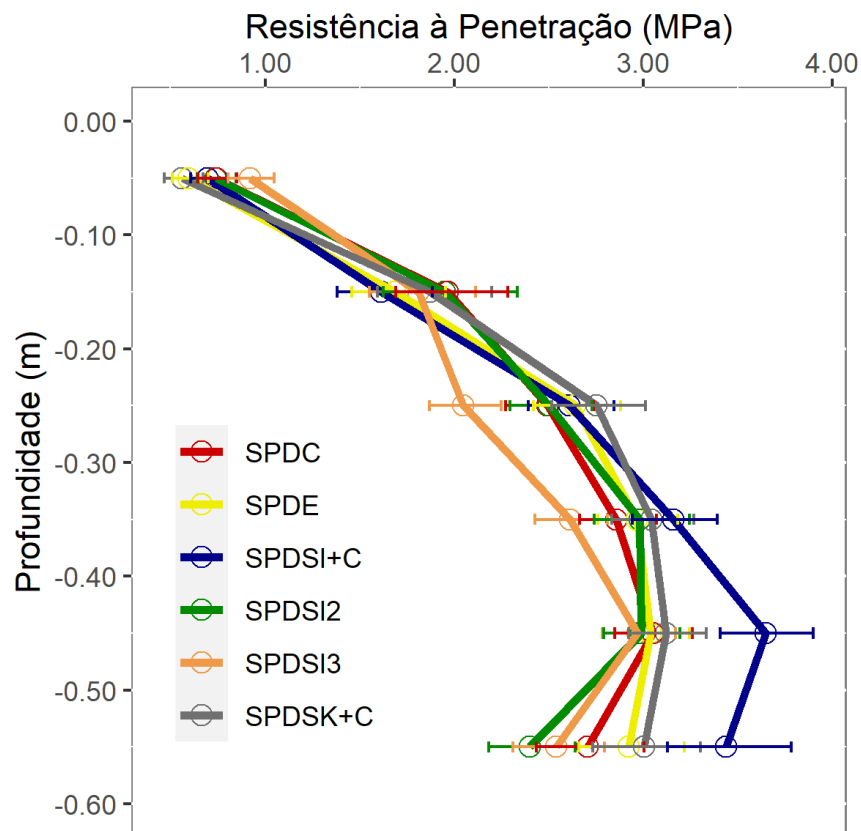
Para a macroporosidade, os tratamentos SI+C e SK+C apresentaram os piores valores em relação ao SPDE na camada superficial, apresentando 0,1 e 0,09 m³ m⁻³ (0-0,10 m), respectivamente, e 0,08 m³ m⁻³ para ambos em 0,10-0,20 m. Os SK+C e SI+C diferiram do SPDC apenas em 0,30 m, apresentando condição pior, sendo a Mac de ambos 0,07 m³ m⁻³. Os resultados expostos para Pt e Mac reforçam que as subsolagens e principalmente, o implemento Ikeda® são mais agressivos ao solo facilitando uma reconsolidação do mesmo mais acentuada, reduzindo assim sua porosidade.

Apesar de, geralmente, a persistência do preparo ocasional na Pt e Mac serem superiores a 2 anos (PEIXOTO et al., 2020), a persistência na melhoria das condições físicas pelo uso de manejo ocasional não se verifica para os atributos de porosidade aqui apresentados depois de 4 anos para SPDE, SI+C e SK+C; 2 anos para SI2; e 1 ano para SI3, pois nenhum manejo em nenhuma profundidade avaliada diferiu do controle.

### 3.2 Resistência do solo à penetração em campo

Na Figura 5, estão apresentadas as médias de RP com seus respectivos intervalos de confiança por profundidade para cada tratamento. A camada superficial (0-0,20 m) apresentou-se com os menores valores de RP entre todas as profundidades avaliadas, não havendo diferença estatística entre os tratamentos. Por sua localidade e extensão, a camada superficial do solo é a que recebe maiores influências de manejo das culturas, desde a semeadura, passando pelos tratos culturais até a colheita. Na operação de semeadura, por exemplo, é comum de se utilizar haste sulcadora para abrir o sulco e depositar o adubo, ocorrendo assim a mobilização do solo e reduzindo o impedimento mecânico do mesmo nessa profundidade inicial (DRESCHER et al., 2017).

Figura 5 - Médias de resistência à penetração do solo em campo e seus respectivos intervalos de confiança por profundidade para cada manejo do solo.



SPDC – SPD contínuo (14 anos); SPDE – SPD escarificado com Stara Fox® até 0,26 m em 2015; SPDSI+C – SPD subsolado com Ikeda® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície; SPDSI2 – SPD subsolado com Ikeda® a cada 2 anos (2015/2017); SPDSI3 – SPD subsolado com Ikeda® a cada 3 anos (2015/2018); SPDSK+C – SPD subsolado com Kamaq® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário na profundidade entre 0,40–0,60 m.

Na camada de 0,20-0,30 m, o manejo do solo com subsolagem a cada três anos (SI3) apresentou menor RP em relação aos demais, sendo seu valor médio 2,0 MPa. Isto pode ser explicado pelo fato de o SI3 ser o tratamento que recebeu a subsolagem mais recente (2018) dentre os outros tratamentos no momento da avaliação (novembro, 2019), demonstrando que a subsolagem aliviou a resistência dessa camada do solo e o efeito da operação em subsuperfície foi superior a 12 meses. Contudo, esse efeito se mostrou inferior a 24 meses, visto que, o manejo com subsolagem a cada 2 anos (SI2), e, portanto, com a última operação realizada em 2017, não diferiu do SPDC. Estudos têm mostrado que de forma geral a persistência das operações de preparo ocasional em SPD é de até 24 meses (DRESCHER et al., 2012; BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020), porém com poucos registros para subsolagem (PEIXOTO et al., 2019a).

Comparado ao SPDC, o SI+C apresentou maior RP (média 3,8 MPa) na camada de 0,40-0,60 m, sugerindo que a reconsolidação do solo após a subsolagem tornou o mesmo mais restritivo fisicamente depois de 4 anos de operação em relação ao manejo sem preparo ocasional. Peixoto et al. (2019b), ao avaliar os efeitos das operações de preparo ocasional nesta mesma área logo após a subsolagem feita em 2015, observaram que o SI+C não apresentava restrições em RP, além de apresentar naquela safra a maior produtividade dentre os tratamentos. Essa condição só foi observada nesse tratamento, onde se utilizou o subsolador com ponteira alada (Ikeda®), visto que para o manejo do solo com subsolador de ponteira convencional (SK+C) não houve diferença em relação ao SPDC em nenhuma camada avaliada (0-0,60m). Os subsoladores de ponteira alada promovem de 2 a 3 vezes mais perturbação ao solo que os subsoladores de ponteira convencional (KUMAR; THAKUR, 2005). Assim, pode-se concluir que apesar do efeito benéfico imediato de descompactação do solo refletindo positivamente na produtividade, devido a essa perturbação, o solo se torna mais vulnerável à deformação pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas (HAMZA; ANDERSON, 2005), podendo ocasionar maior restrição física em relação a condição inicial.

O tratamento controle juntamente com os manejos SPDE, SPDSI2 e SPDSK+C não apresentaram diferença significativa entre si para nenhuma profundidade avaliada.

Estes resultados podem ser devido a duas principais causas: a primeira é a reduzida persistência do preparo ocasional, visto que, esses manejos já superaram 24 meses (SPDSI2) e 48 meses (SPDE e SPDSK+C) desde as operações realizadas (2015). A segunda é que a umidade do solo ( $\theta$ ) no momento da avaliação não se mostrou adequada para o diagnóstico da compactação do solo utilizando a RP como indicador, por estar próxima a CC (Tabela 2), podendo mascarar áreas compactadas, pois a presença da água provoca um efeito lubrificante no solo, deixando-o mais plástico e facilitando a penetração da haste (ASSIS et al., 2009), levando a menor capacidade de distinguir os ambientes.

Tabela 2 - Valores médios de umidade do solo na capacidade de campo ( $\theta$  CC) e umidade do solo no momento da avaliação *in situ* para todos os tratamentos ao longo do perfil (0-0,60 m) para o ano de 2019.

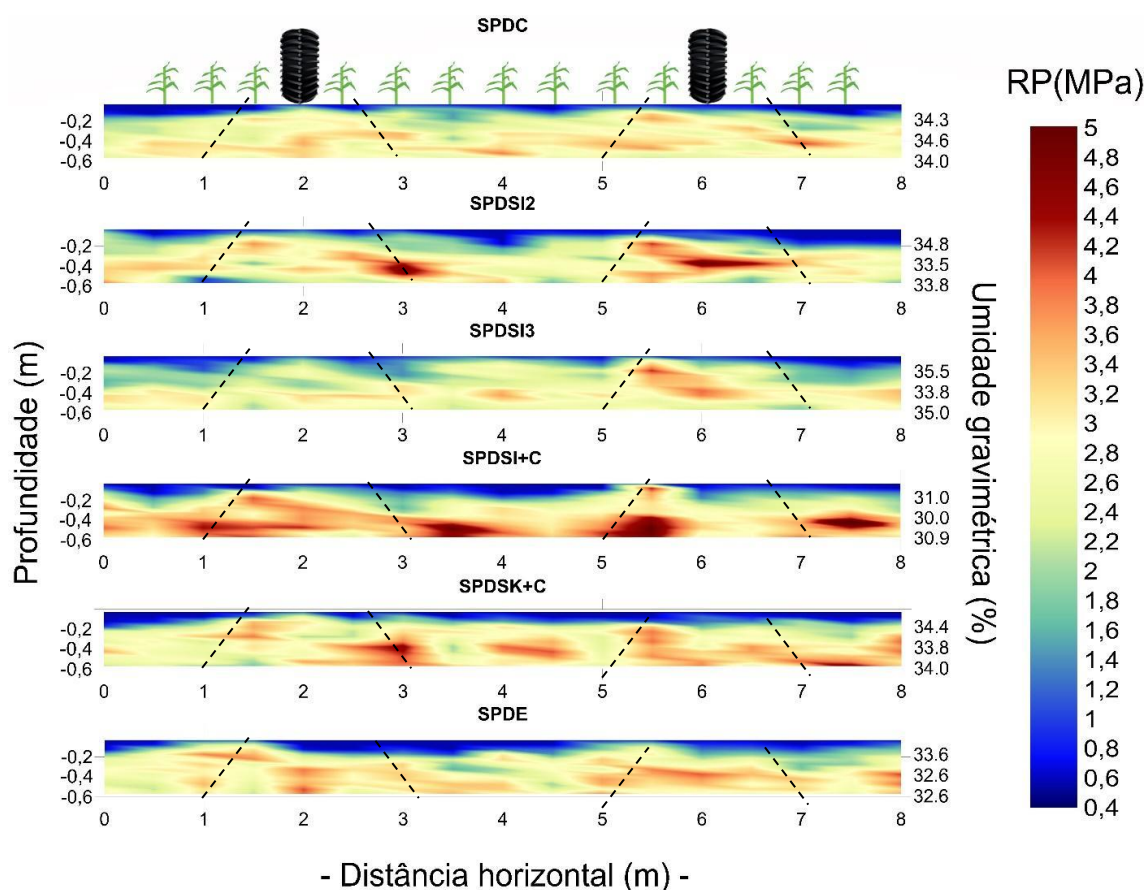
<b>Tratamento</b>	<b><math>\theta</math> CC (%)</b>	<b><math>\theta</math> <i>in situ</i> (%)</b>
<b>SPDC</b>	32,11	34,27
<b>SPDSI2</b>	30,44	34,05
<b>SPDSI3</b>	31,33	34,74
<b>SPDSI+C</b>	28,25	30,66
<b>SPDSK+C</b>	29,95	34,09
<b>SPDE</b>	30,18	32,94

SPDC – SPD contínuo (14 anos); SPDE – SPD escarificado com Stara Fox® até 0,26 m em 2015; SPDSI+C – SPD subsolado com Ikeda® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície; SPDSI2 – SPD subsolado com Ikeda® a cada 2 anos (2015/2017); SPDSI3 – SPD subsolado com Ikeda® a cada 3 anos (2015/2018); SPDSK+C – SPD subsolado com Kamaq® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário na profundidade entre 0,40–0,60 m.

### 3.2.1 Mapas 2D de resistência à penetração em campo

Os mapas 2D de RP (Figura 6) permitem a observação das variações espaciais desse indicador no sentido vertical e horizontal dos tratamentos. A ferramenta possibilitou a identificação do impacto do rodado do pulverizador no solo (áreas vermelhas).

Figura 6 - Mapas 2D de resistência à penetração para os manejos do solo até a profundidade de 0,60 m e suas respectivas umidades.



SPDC – SPD contínuo (14 anos); SPDE – SPD escarificado com Stara Fox® até 0,26 m em 2015; SPDSI+C – SPD subsolado com Ikeda® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície; SPDSI2 – SPD subsolado com Ikeda® a cada 2 anos (2015/2017); SPDSI3 – SPD subsolado com Ikeda® a cada 3 anos (2015/2018); SPDSK+C – SPD subsolado com Kamaq® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário na profundidade entre 0,40–0,60 m.

De maneira geral, em consonância com o observado na Figura 5, para todos os manejos do solo, os menores valores de RP foram observados na camada superficial (0–0,20 m) em toda a extensão horizontal avaliada. Ao passo que os maiores valores são observados na camada de maior profundidade (0,40–0,60 m) e nos pontos que sofreram influência do rodado do pulverizador, ou seja, de 1,0 a 3,0 m e de 5,0 a 7,0 m na horizontal, demarcados nos mapas pelas linhas pontilhadas.

Observa-se que nos manejos SPDSI+C, SPDSK+C e SPDSI2 ocorrem zonas de RP maiores (áreas vermelhas) em relação ao tratamento controle, que pode ser explicado pela reconsolidação do solo, uma vez que tais tratamentos só passaram por uma operação em 2015, e no caso de SI2 uma segunda em 2017, excedendo o tempo de persistência (2 anos) das operações de preparo ocasional em SPD (DRESCHER et al., 2012; BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020), corroborando com o observado nos atributos físicos do solo avaliados em laboratório.

O mapa 2D do manejo SI+C apresentou maiores valores de RP abaixo da camada superficial. Além da perturbação maior e reconsolidação do solo intensificada pelo tipo de ponteira do subsolador Ikeda®, o tratamento SI+C apresentava o menor valor de umidade (30,66%) dentre os mapas no momento da avaliação (Tabela 2), permitindo a identificação de zonas compactadas (áreas vermelhas) com maior clareza devido a RP se expressar melhor com a umidade do solo reduzida.

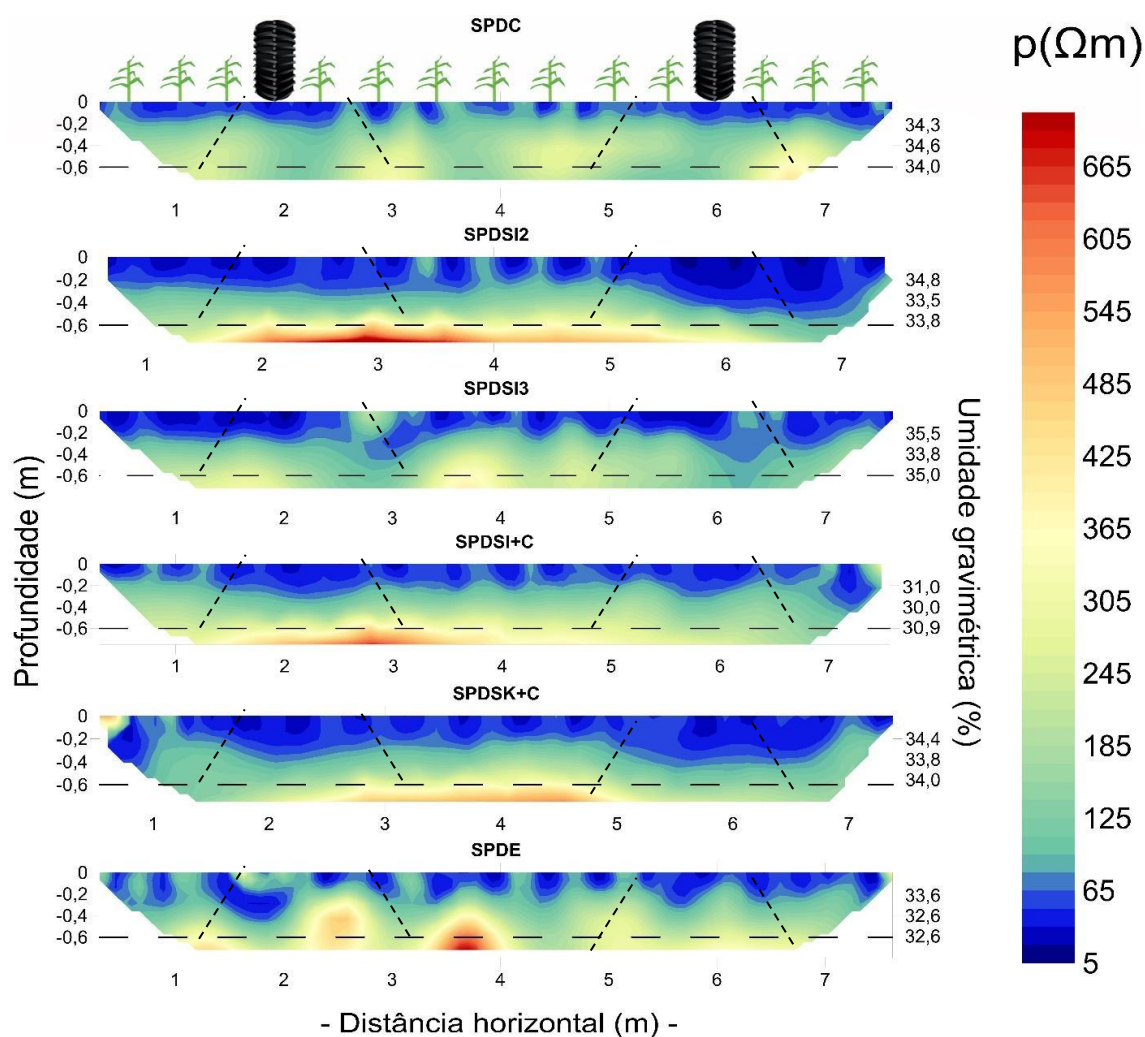
A identificação da área sob influência do rodado (linhas pontilhadas) é mais nítida para os manejos SDPSI2, SPDSI+C, SPDSK+C, SPDE e mais dificultada em SPDSI3 e SPDC. Tal efeito pode ser resultado das dificuldades para identificação do rastro do pulverizador no momento da análise, devido ao intervalo de tempo em que este havia passado na área (aproximadamente 3 meses) somado ainda a umidade do solo no momento da determinação da RP, que como apresentado na Tabela 2, se encontrava próxima a CC. A determinação da RP com a  $\theta$  correspondente à CC não se apresenta como ideal para avaliar o grau de compactação do solo, uma vez que, em condições mais úmidas a RP tem baixa sensibilidade às variações de densidade do solo, segundo Peixoto et al. (2019a). Por isso, esses autores sugeriram uma faixa ótima de umidade para diagnóstico da compactação do solo usando a RP como indicador, no potencial mátrico em torno de -0,10 MPa, portanto, mais seco que a CC usualmente estimada em -0,010 MPa ou ainda -0,033 MPa.

### **3.3 Resistividade elétrica do solo**

A Figura 7 apresenta os mapas 2D de tomografia de resistividade elétrica do solo. Os mapas permitem a observação das variações espaciais da resistividade no sentido vertical e horizontal dos tratamentos. A ferramenta possibilitou a observação das linhas de plantio e de impacto do rodado do pulverizador no solo.

Figura 7 - Mapas 2D de tomografia de resistividade elétrica do solo para os manejos de solo e suas respectivas umidades.





SPDC – SPD contínuo (14 anos); SPDE – SPD escarificado com Stara Fox® até 0,26 m em 2015; SPDSI+C – SPD subsolado com Ikeda® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície; SPDSI2 – SPD subsolado com Ikeda® a cada 2 anos (2015/2017); SPDSI3 – SPD subsolado com Ikeda® a cada 3 anos (2015/2018); SPDSK+C – SPD subsolado com Kamaq® em 2015 + aplicação de 1,44 t ha<sup>-1</sup> de calcário na profundidade entre 0,40–0,60 m.

Em todos os manejos do solo, a ferramenta se mostrou eficiente para a identificação da área sob influência do rodado (linhas pontilhadas), bem como das linhas de plantio da cultura do milho. A linha de plantio é um ambiente de maior porosidade e ação de raízes, logo, sob elevada condição de umidade a RES é reduzida, podendo ser identificada no mapa pelos bulbos azuis em superfície abaixo das plantas representadas. A área do rodado do pulverizador autopropelido gera compactação do solo com redução drástica de porosidade, muito diferente do solo adjacente, e nessa área o grau de saturação é maior, fazendo com que a  $\rho$  reduza muito. Dessa forma, tanto os valores de  $\rho$  na área sobre influência do rodado quanto na linha de plantio são baixos, porém, por motivos distintos.

As diferenças entre tratamentos usando os mapas 2D de RES não ficaram tão claras, possivelmente devido a avaliação realizada com umidade do solo próxima a CC no momento da sondagem, que confunde os efeitos de aumento e redução da porosidade do solo na  $\rho$ , gerando dificuldade na interpretação dos mapas. Por exemplo, analisando o SPDSI3, observa-se que este manejo apresentou a menor RP (Figura 5) e, portanto, menor densidade do solo e maior porosidade, logo, em condições de maior umidade do solo tem menor  $\rho$ , pois o grau de saturação é maior, gerando mapa de RES similar a SPDC, como se fossem similares. Porém, uma menor  $\rho$  também indicaria uma possível área compactada, o que não procede no caso de SI3.

Em estudo conduzido em Latossolo por Melo et al. (2021), concluiu-se que a RES sofre maior influência pela  $\theta$  do que pela compactação do solo, devendo o diagnóstico desta ser realizado sob condições de solo mais seco, para eliminar o efeito preponderante da umidade. Em elevada  $\theta$  variações de porosidade não geram grandes variações na  $\rho$ , por isso, os mapas de maneira geral ficaram muito similares.

### 3.4 Propriedades químicas do solo

Na Tabela 3 estão apresentados os indicadores de fertilidade do solo avaliados para os diferentes preparos de solo e profundidades amostradas. Avaliou-se cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), pH em CaCl, saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e teor de matéria orgânica no solo (M.O.).

Os manejos do solo sem aplicação de calcário não alteraram positivamente os indicadores de fertilidade do solo avaliados, independente da profundidade. Os teores de matéria orgânica do solo não foram alterados por nenhum dos preparos ocasionais realizados.

Tabela 3 - Indicadores de fertilidade do solo nos diferentes manejos do solo e camadas de amostragem.

Tratamento	Ca		Mg		pH (CaCl)		V		m		M.O	
	----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----						----- % -----				g kg <sup>-1</sup>	
<b>0-0,10 m</b>												
SPDC	2,38	a	0,45	a	4,48	a	41,6	ab	9,5	abc	4,03	a
SPDE	1,65	a	0,33	a	4,50	a	36,9	ab	11,6	bc	3,70	a
SPDSI+C	3,10	a	0,93	b	5,15	b	57,7	b	2,3	a	3,80	a
SPDSI2	2,23	a	0,45	a	4,40	a	41,2	ab	6,3	abc	3,75	a

<b>SPDSI3</b>	1,85	a	0,30	a	4,08	a	32,4	a	15,0	c	3,85	a
<b>SPDSK+C</b>	2,43	a	0,60	ab	4,60	a	44,4	ab	5,4	ab	3,80	a
<b>0,10-0,20 m</b>												
<b>SPDC</b>	2,03	a	0,35	ab	4,65	a	42,5	a	3,6	a	10,45	a
<b>SPDE</b>	1,40	a	0,25	a	4,68	a	32,9	a	3,1	a	8,62	a
<b>SPDSI+C</b>	1,93	a	0,65	b	4,95	a	45,4	a	3,3	a	3,49	a
<b>SPDSI2</b>	2,10	a	0,45	ab	4,58	a	43,3	a	3,4	a	5,32	a
<b>SPDSI3</b>	1,33	a	0,20	a	4,38	a	28,7	a	3,4	a	15,42	a
<b>SPDSK+C</b>	2,10	a	0,43	ab	4,78	a	45,7	a	3,2	a	4,91	a
<b>0,20-0,40 m</b>												
<b>SPDC</b>	1,65	ab	0,33	ab	4,85	ab	41,4	ab	3,1	a	6,06	a
<b>SPDE</b>	1,08	a	0,23	a	4,83	ab	32,0	a	2,9	a	6,40	a
<b>SPDSI+C</b>	1,10	a	0,40	ab	4,98	ab	37,9	ab	2,9	a	5,61	a
<b>SPDSI2</b>	1,40	ab	0,35	ab	4,80	ab	40,2	ab	2,9	a	5,06	a
<b>SPDSI3</b>	1,28	a	0,18	a	4,58	a	36,0	a	3,3	a	7,53	a
<b>SPDSK+C</b>	2,48	b	0,68	b	5,45	b	59,5	b	2,8	a	3,31	a
<b>0,40-0,60 m</b>												
<b>SPDC</b>	1,35	ab	0,28	a	4,98	ab	40,6	ab	2,7	a	5,75	a
<b>SPDE</b>	1,13	ab	0,23	a	5,13	ab	34,0	a	2,5	a	6,50	a
<b>SPDSI+C</b>	0,95	a	0,38	a	5,23	ab	37,9	ab	2,5	a	4,59	a
<b>SPDSI2</b>	1,25	ab	0,35	a	5,00	ab	41,8	ab	2,4	a	5,57	a
<b>SPDSI3</b>	1,18	ab	0,20	a	4,83	a	36,3	ab	2,7	a	8,41	a
<b>SPDSK+C</b>	1,93	b	0,60	a	5,38	b	55,5	b	2,5	a	4,14	a

Médias com letras iguais na mesma camada de solo não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Na camada superficial (0-0,20 m), o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  não se alterou para nenhum dos tratamentos. O manejo com subsolagem realizada em 2015 associada a aplicação superficial de calcário (SI+C) apresentou os maiores teores de  $\text{Mg}^{2+}$ , sendo 0,93  $\text{cmol/dm}^3$  para 0-0,10 m e 0,65  $\text{cmol/dm}^3$  para 0,10-0,20 m, não diferindo este último do SPDC. Em 0-0,10 m, o SI+C também apresentou os maiores valores para pH (5,15) e V% (57,7%), não diferindo este do controle. A saturação por alumínio (m%) se diferenciou apenas em superfície (0-0,10 m), no SI+C, apresentando a menor saturação (2,3%) em relação ao SI3 e SPDE, não diferindo do controle nas profundidades avaliadas.

Abaixo de 0,20 m o manejo com subsolagem associada a aplicação de calcário em profundidade (SK+C) apresentou os melhores valores, apesar de não diferir do controle para nenhuma profundidade avaliada. Em 0,20-0,40 m, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram 2,47 e 0,67  $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ , respectivamente. Abaixo de 0,40 m, o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  superou SI+C, sendo 1,92  $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ . E em 0,20-0,60 m, o SK+C apresentou pH médio de 5,4 e saturação por base média de 57,5%, diferindo do SI3 e SPDE, respectivamente.

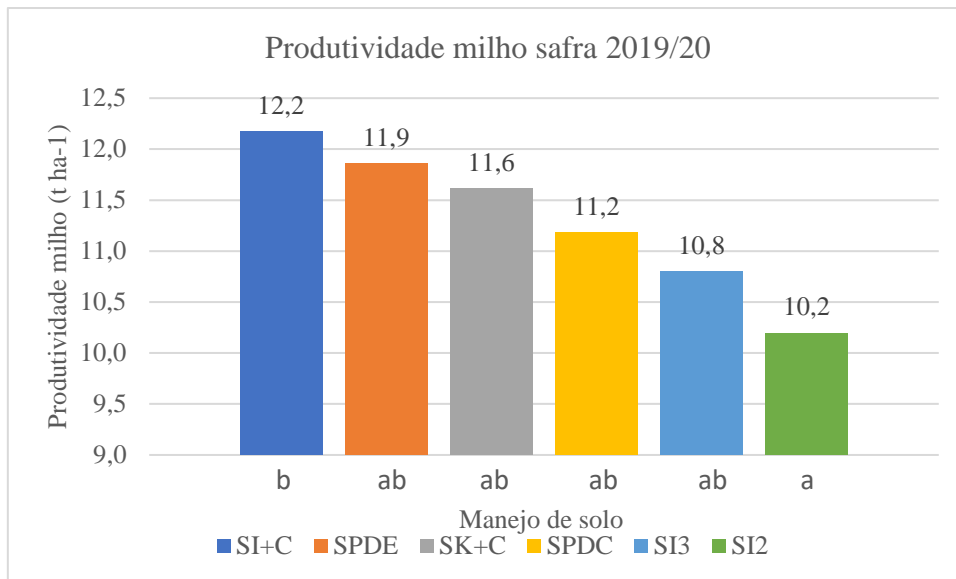
As melhores condições químicas se encontram nos manejos com aplicação de calcário. Portanto, a aplicação de calcário promoveu redução na saturação por alumínio, aumento de  $\text{Mg}^{2+}$ , pH e V% em superfície no manejo com subsolagem associada a aplicação de calcário superficial e em subsuperfície o aumento dos mesmos indicadores, acrescido do  $\text{Ca}^{2+}$ , no manejo com subsolagem associada a aplicação de calcário em profundidade. Tanto para SI+C quanto para SK+C, após 4 anos da aplicação do insumo, vê-se o efeito do calcário reagido ao quantificar melhorias dos indicadores de qualidade química nesses tratamentos.

Os resultados observados são devidos a reação do insumo nas camadas do solo onde foram aplicados, visto que o calcário ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ) em contato com a água se solubiliza e dissocia, os íons de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  se adsorvem aos colóides do solo, substituindo o alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ). Este por sua vez, se liga as hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) liberadas pelo carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), formando os precipitados  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , forma atóxica para as plantas, reduzindo a saturação por alumínio. Os hidrogênios ( $\text{H}^+$ ) que estavam presentes na solução do solo se unem as hidroxilas formando  $\text{H}_2\text{O}$ , reduzindo a acidez ativa do solo, elevando assim o pH. (MOREIRA, 2018)

### 3.5 Produtividade das culturas

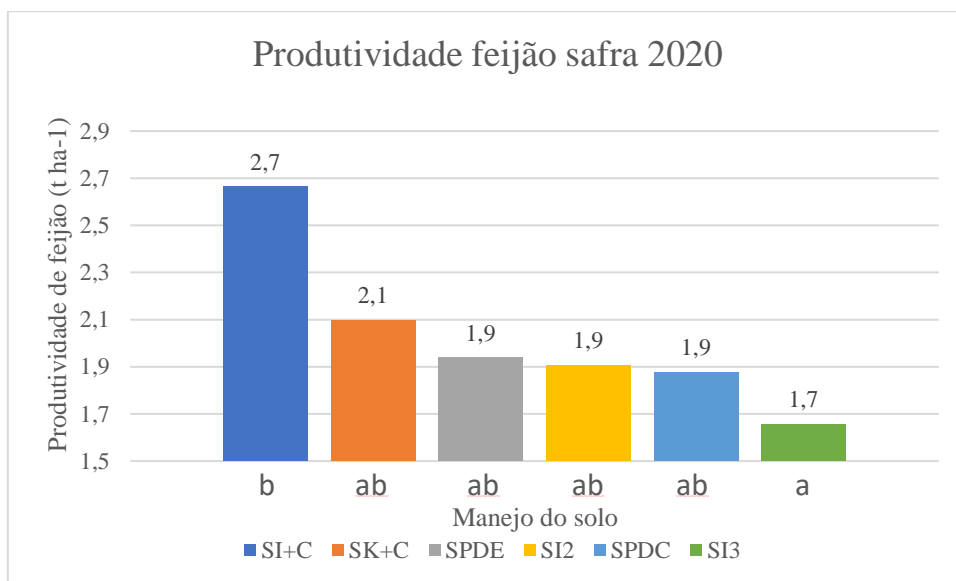
Na primeira safra do ano agrícola 2019/20 foi escolhido para cultivo a cultura do milho e na segunda safra 2020, foi realizado o cultivo de feijão. O manejo com subsolagem associada à aplicação de calcário em superfície (SI+C) promoveu maior produtividade de milho, 12,2  $\text{t ha}^{-1}$ , em relação ao subsolado a cada 2 anos (SI2), 10,2  $\text{t ha}^{-1}$  (Figura 11), e maior produtividade de feijão, 2,7  $\text{t ha}^{-1}$ , em relação ao subsolado a cada 3 anos (SI3), 1,7  $\text{t ha}^{-1}$ . (Figura 12).

Figura 11 - Produtividade de milho na safra de verão 2019/2020 em função dos manejos do solo.



Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Figura 12 - Produtividade de feijão na safra de outono/inverno de 2020 em função dos manejos do solo.



Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Estes resultados podem estar relacionados à melhoria da fertilidade do solo (aumento do pH, saturação por bases e  $Mg^{2+}$  e redução da saturação por alumínio na camada superficial) e não pela melhoria das condições físicas do solo, visto que, além da reduzida persistência do preparo ocasional, o SI+C apresentou os maiores valores de RP, Ds, menores de Pt e Mac, indicando condições mais restritivas de estruturação física do solo, porém, não suficiente para interferir negativamente na produtividade da cultura. O

SPDSI+C diferiu estatisticamente apenas do manejo subsolado a cada 2 anos (SI2) na primeira safra e do SI3 na segunda safra.

Nos anos subsequentes à implantação do experimento (2016 e 2017) houve maior influência da melhoria física que de fertilidade do solo no aumento da produtividade dos cultivos, conforme relatado por Peixoto et al. (2019a, 2019b), especialmente na cultura da soja. Segundo os autores, os efeitos do preparo ocasional nas propriedades físicas do solo estavam persistentes e o calcário aplicado nos tratamentos SPDSI+C e SPDSK+C ainda não havia reagido a ponto de alterar os atributos de fertilidade do solo.

Além disso, os manejos com subsolagens frequentes, como o SI2 (2015/2017) e o SI3 (2015/2018), podem ter prejudicado o desenvolvimento radicular das plantas pela possível reestruturação do solo não adequada, refletindo negativamente na produtividade das culturas. Entretanto, destaca-se que não houve diferença estatística entre SI+C e o controle para ambas as safras. Portanto, ainda não há evidência do efeito das práticas combinadas de manejo quanto ao aumento de produtividade.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os manejos com preparo ocasional tiveram efeito positivo persistente sobre a estruturação do solo de no mínimo 12 meses, não ultrapassando 24 meses. Após esse período, observou-se aumento significativo dos indicadores físicos de compactação do solo, principalmente em profundidade.

A resistividade elétrica do solo se mostrou sensível à identificação das linhas de plantio e do rodado do pulverizador, porém não foi possível observar distinções entre os manejos devido as condições de umidade, próxima a capacidade de campo, no momento da avaliação. Sugere-se que seja feita em condição mais seca e realizada junto a avaliação de RP, atrelando seus resultados.

As propriedades físicas do solo determinadas em laboratório diferenciaram os manejos com subsolagem realizadas em 2015 dos demais, apresentando as piores condições físicas. Já a aplicação de calcário melhorou as condições químicas do solo e refletiu no incremento de produtividade no manejo com calcário em superfície em relação aos manejos subsolados a cada 2 e 3 anos, na safra e safrinha, respectivamente.

Um solo identificado como compactado por atributos físicos não necessariamente é restritivo ao desenvolvimento das culturas, e mais estudos são necessários para conclusão quanto a tomada de decisão de uso de preparo ocasional.

## REFERÊNCIAS

- ARRUDA, A. B.; SOUZA, R. F. de; BRITO, G. H. M.; MOURA, J. B. de; OLIVEIRA, M. H. R. de; SANTOS, J. M. dos; DUTRA E SILVA, S. Resistance of soil to penetration as a parameter indicator of subsolation in crop areas of sugar cane. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–9, 2021. doi: 10.1038/s41598-021-91186-3.
- ASSIS, R.L.; LAZARINI, G.D.; LANÇAS, K.P. & CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 29, n.4, p.558-568, out./dez. 2009. doi:10.1590/S0100-69162009000400006.
- BATISTA, P. H. D.; DE ALMEIDA, G. L. P.; DE LIMA, R. P.; PANDORFI, H.; DA SILVA, M. V.; ROLIM, M. M. Impact of short-term grazing on physical properties of Planosols in Northeastern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 19, 2019. doi: 10.1016/j.geodrs.2019.e00234.
- BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. . F. J. F. Gamaespectrometria Trica E Susceptibilidade Magn E. v. 23, p. 371–405, 2005.
- BECKETT, C. T. S.; BEWSHER, S.; GUZZOMI, A. L.; LEHANE, B. M.; FOURIE, A. B.; RIETHMULLER, G. Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. May 2017, p. 150–157, 2018. doi:10.1016/j.still.2017.09.009.
- BESSON, A.; COUSIN, I.; SAMOUËLIAN, A.; BOIZARD, H.; RICHARD, G. Structural 34 heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2 SPEC.ISS., p. 239–249, 2004. doi: 10.1016/j.still.2004.07.012.
- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, n. March, p. 164–200, 2018.
- BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil and Tillage Research**, v. 198, n. November 2019, p. 104534, 2020.
- BUSSCHER, W.J. & BAUER, P.J. Soil strength, cotton root growth and lint yield in a southeastern USA coastal loamy sand. *Soil Till. Res.*, 74:151-159, 2003.
- CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. DA S.; MOURA, M. R. D. de; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. DE J. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1207–1216, 2011.
- DE 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. **Ciencia Rural**, v. 37, n. 4, p. 1166–1169, 2007.
- DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–25, 2010.
- DEVINE, S.; MARKEWITZ, D.; HENDRIX, P.; COLEMAN, D. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession



- after three decades. **PLoS ONE**, v. 9, n. 1, 2014.
- DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. **Plant Soil**, 98:303-312, 1987.
- DIAS JUNIOR, M. D. SOUZA; TASSINARI, D. Compactação Do Solo – Atualização. n. 1, p. 1–63, 2018.
- DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1836–1844, 2012. doi: 10.1590/S0100-06832012000600018.
- DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.; SILVA, B. R. da; ZARDIN, M. C. Fertilizer shanks to promote soil decompaction in the seeding operation. **Ciência Rural**, v. 47, n. 3, 2017. doi: 10.1590/0103-8478cr20160026.
- EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2ª edição revista. Documentos 132. **Embrapa Solos**. Rio de Janeiro, RJ. Dezembro, 2011. INSS 1517-2627. Disponível em: < <http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>>. Acesso em: agosto, 2022.
- FEBRAPDP. **Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto**. 2022. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/noticias/1155/sistema-plantio-direto-tem-desafios-e-metas-a-serem-atingidas-nos-proximos-10-anos>>. Acesso em: agosto, 2022.
- FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e na produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:627-636, 2007.
- HAKANSSON, I. A Method for Characterizing the State of Compactness of the Plough Layer. **Soil & Tillage Research**, v. 16, p. 105–120, 1990.
- HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil & Tillage Research**, v. 53, p. 71–85, 2000.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005.
- HARTGE, K.; BOHNE, H.; SCHREY, H. P.; EXTRA, H. Penetrometer measurements for screening soil physical variability. **Soil & Tillage Research**, v. 28, n. 21, p. 343–350, 1985.
- HERRICK, J. E.; JONES, T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 2–4, 2002.
- JEŘÁBEK, J.; ZUMR, D.; DOSTÁL, T. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, v. 174, n. August, p. 231–240, 2017. doi: 10.1016/j.still.2017.07.008.
- KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of Conservation Agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 1, p. 29–51, 2019.

KELLER, T.; COLOMBI, T.; RUIZ, S.; MANALILI, M. P. Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. **Vadose Zone Journal**, n. 2003, 2017.

KLUTE, A. Water Retention: Laboratory Methods. **American Society of Agronomy**, v. 9, n. 9, p. 635–662, 1986.

KOOISTRA, M. J.; TOVEY, N. K. Chapter 5 - Effects of compaction on soil microstructure. **Soil Compaction in Crop Production**, v.11, p. 91–111, 1994. doi: 10.1016/B978-0-444-88286-8.50013-1.

KOWALCZYK, S.; MAŚLAKOWSKI, M.; TUCHOLKA, P. Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction. **Journal of Applied Geophysics**, v. 110, p. 43–50, 2014.

KUMAR, A.; THAKUR, T. C. An investigation into comparative test of conventional and winged subsoilers. In: 2005 ASAE Annual International Meeting, 051061, St. Joseph, MI. **Anais**. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005. doi:10.13031/2013.19770.

KUROTHE, R. S.; KUMAR, G.; SINGH, R.; SINGH, H. B.; TIWARI, S. P.; VISHWAKARMA, A. K.; SENA, D. R.; PANDE, V. C. Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 126–134, 2014

LAL, R.; REICOSKY, D. C.; HANSON, J. D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 1, p. 1–12, mar. 2007. doi: 10.1016/j.still.2006.11.004.

MELO, L. B. B. de; SILVA, B. M.; PEIXOTO, D. S.; CHIARINI, T. P. A.; DE OLIVEIRA, G. C.; CURI, N. Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 208, 2021. doi: 10.1016/j.still.2020.104876.

MOME FILHO, E. A.; DA SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; GIMENES, F. H. S.; VITTI, A. C. Compared performance of penetrometers and effect of soil water content on penetration resistance measurements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 744–754, 2014.

MOREIRA, S. G. Calagem e gessagem no sistema de produção de grãos. **Rehagro**. Webinar Grãos. 2018. Disponível em: <<https://rehagro.com.br/blog/calagem-e-gessagem-no-sistema-de-producao-de-graos/>>. Acesso em: agosto, 2022.

MOREIRA, S. G. Informações Agronômicas N° 4 : Desafio para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais. **NPCT-Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia**, v. 4, p. 1–12, 2019.

NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G. Soil compaction impact and modelling . A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, p. 291–309, 2013.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J.E.; PAULETTO, E.A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L.F.S. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 119–126, 2015.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SPINELLI PINTO, L. F.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a

compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 7, p. 531–539, jul. 2014. doi: 10.1590/S0100-204X2014000700005

NUNES, M. R.; VAN ES, H. M.; SCHINDELBECK, R.; RISTOW, A. J.; RYAN, M. No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield. **Geoderma**, v. 328, n. April, p. 30–43, 2018. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.04.031.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A. & TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil Till. Res.**, 117:201-210, 2011.

PANAYIOTOPOULOS, K. P.; PAPADOPOULOU, C. P. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. **Soil and Tillage Research**, v. 31, n. 94, p. 323–337, 1994.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; DE OLIVEIRA, G. C.; MOREIRA, S. G.; DA SILVA, F.; CURI, N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. July, p. 104307, 2019a. doi: 10.1016/j.still.2019.104307.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C. de; MOREIRA, S. G.; DA SILVA, F.; CURI, N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. July, p. 104307, 2019b.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, L. D. C. M. da; MELO, L. B. B. de; AZEVEDO, R. P.; ARAÚJO, B. C. L.; CARVALHO, T. S. de; MOREIRA, S. G.; CURI, N.; SILVA, B. M. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 745, p. 140887, 2020.

PICCOLI, I.; FURLAN, L.; LAZZARO, B.; MORARI, F. Examining conservation agriculture soil profiles: Outcomes from northeastern Italian silty soils combining indirect geophysical and direct assessment methods. **European Journal of Soil Science**, n. June, p. 1–12, 2019.

POTT, L. P.; AMADO, T. J. C.; LEAL, O.A.; CIAMPITTI, I. A. Mitigation of soil compaction for boosting crop productivity at varying yield environments in southern Brazil. **European Journal of Soil Science**, n. March, p. 1–16, 2019.

REICHERT, J. M.; BRANDT, A. A.; RODRIGUES, M. F.; DA VEIGA, M.; REINERT, D. J. Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? **Geoderma**, v. 301, n. May, p. 72–79, set.2017. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.04.012

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R. HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 242–254, 2009.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, v.27, p.29-48, 2003.

ROMERO-RUIZ, A.; LINDE, N.; KELLER, T.; OR, D. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. **Reviews of Geophysics**, v. 56, p. 672–697, 2018.

- 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.
- SCHLÜTER, S.; GROBMANN, C.; DIEL, J.; WU, G.; TISCHER, S.; DEUBEL, A.; RÜCKNAGEL, J. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 332, n. July, p. 10–19, 2018.
- SELADJI, S.; COSENZA, P.; TABBAGH, A.; RANGER, J.; RICHARD, G. The effect of compaction on soil electrical resistivity : a laboratory investigation. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 1043–1055, 2010.
- SILVA, S.R. DA; DE BARROS, N. F.; DA COSTA, L. M.; LEITE, F. P. Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 921–932, 2008.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Soil Science Society of America: Glossary of soil science terms**. [s.l.: s.n.]. v. 42. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/soils-glossary>>. Acesso em: agosto, 2022.
- STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; DA 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, n. 3, p. 774–782, 2014. doi: 10.1590/S0100-06832014000300009.
- STOLF, R.; THURLER, Á. D. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Method to estimate 37 soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 447–459, 2011. doi: 10.1590/S0100-06832011000200014.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. **Biblioteca Universitária**. Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses. 3. ed. rev., atual. e ampl. Lavras, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/11017>. Acesso em: setembro, 2022.
- VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; DE MARIA, I. C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92–101, 2011.
- VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1–2, p. 104–113, jan. 2007. doi: 10.1016/j.still.2006.01.008.
- YADAV, G. S.; BABU, S.; DAS, A.; MOHAPATRA, K. P.; SINGH, R.; AVASTHE, R. K.; ROY, S. No-till and mulching enhance energy use efficiency and reduce carbon footprint of a direct-seeded upland rice production system. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, p. 122700, 2020.
- ZHANG, S.; LI, Q.; LÜ, Y.; SUN, X.; JIA, S.; ZHANG, X.; LIANG, W. Conservation tillage positively influences the microflora and microfauna in the black soil of Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v. 149, p. 46–52, 2015. doi: 10.1016/j.still.2015.01.001.