



LÁZARO LONGUE MOSA

**DIAGNOSTICO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM
SISTEMA PLANTIO DIRETO E MONITORAMENTO
DOS EFEITOS DO PREPARO MECÂNICO NAS
PROPRIEDADES DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE
GRÃOS**

LAVRAS – MG

2022

LÁZARO LONGUE MOSA

**DIAGNOSTICO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMA PLANTIO
DIRETO E MONITORAMENTO DOS EFEITOS DO PREPARO MECÂNICO
NAS PROPRIEDADES DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Orientador

LAVRAS – MG

2022

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Mosa, Lázaro Longue.

Diagnostico da compactação do solo em sistema plantio direto
e monitoramento dos efeitos do preparo mecânico nas
propriedades do solo e na produtividade de grãos / Lázaro Longue
Mosa. - 2022.

67 p. : il.

Orientador(a): Bruno Montoani Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Preparo ocasional. 2. Qualidade física do solo. 3. Manejo do
solo. I. Silva, Bruno Montoani. II. Título.

LÁZARO LONGUE MOSA

**DIAGNOSTICO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO
E MONITORAMENTO DOS EFEITOS DO PREPARO MECÂNICO NAS
PROPRIEDADES DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

**DIAGNOSIS OF SOIL COMPACTION IN NO-TILL SYSTEM AND MONITORING
OF THE EFFECTS OF MECHANICAL PREPARATION ON SOIL PROPERTIES
AND GRAIN PRODUCTIVITY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de maio de 2022.

Dr. Eduardo da Costa Severiano – IF Goiano

Dr. Junior Cezar Avanzi - UFLA

Dr. Bruno Montoani Silva

Orientador

LAVRAS – MG

2022

À Deus, que preparou meu caminho até aqui

AGRADEÇO

À minha família. Meus pais, Leucir Mosa e Izabel de Fátima Longue Mosa, e meus avós Zeferino Miranda Mosa (in memoriam) e Iracy nascimento Mosa, que sonharam esse dia muito antes de mim.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que de formas inexplicáveis preparou meu caminho até aqui e foi a minha força nos dias difíceis. Obrigado Pai, pois eu estava perdido quando sai de casa, e a distância da minha família e amigos perturbava minha mente, mas o Senhor colocou na minha vida as pessoas certas, nas horas certas. Obrigado Pai, porque eu não acreditei em mim na maior parte do tempo, mas eu sempre senti a Sua presença, e isso foi mais que o suficiente.

À minha família, que nunca mediu esforços para que eu chegasse até aqui. Tantas vezes vocês abriram mão do conforto de vocês para que eu pudesse ter mais oportunidades. Vocês sempre foram minha fonte de inspiração e força. Eu não seria nada sem vocês.

À minha namorada e melhor amiga, Luísa, que depois de mim é quem mais sabe o valor deste trabalho para minha vida. Obrigado por compartilhar tanta vida comigo, e por me motivar de forma tão carinhosa nos momentos em que eu estive desanimado. Esse momento também é seu, e tudo que eu faço é por nós.

Aos meus irmãos Carlos Emanuel e Vinicius, que já lutaram muitas batalhas comigo, e mesmo de longe foram mais presentes do que muitos que estiveram ao meu lado.

À Alcateia (Bruno, Bernardo, Felipe, Vitor, Wallace (safra 2013) e todos que vieram a seguir), por me ensinar que família não é somente um laço de sangue.

Ao meu orientador, Bruno, pela paciência e dedicação que sempre teve, não só a mim, mas a todos do nosso grupo de pesquisa. Obrigado por ser tão fácil conversar com você professor, isso fez toda a diferença durante esses anos em que estive no mestrado.

Ao Devison Peixoto, primeiramente pela amizade e por ter sido um irmão mais velho durante esses anos, sempre com bons conselhos entre as viagens de campo e as cervejas que dividimos. Em segundo lugar porque o suor dele também está nesse trabalho. Muito obrigado irmão.

À minha amiga Laís Lemos, que saiu do Espírito Santo comigo para se aventurar no mestrado em Lavras.

Aos amigos do DCS Monna Lysa, Fernandes, Patrini, Pedro, André, Lucas, Leticia, Thales, Bruna, Thayná, Brunno e Brenda, que tanto me acolheram e fizeram me sentir em casa estando em Lavras. Aos amigos de república, Marcelo, Irwing, Laura, Stenio, Cassio e Ana Luísa, por todo acolhimento e momentos inesquecíveis que passamos juntos. Agradeço também aos técnicos do DCS Doroteo e Pezão, por toda a ajuda no desenvolvimento dos projetos e pelas risadas que demos juntos.

À universidade Federal de Lavras (UFLA), por todo apoio no desenvolvimento dos trabalhos referentes a esta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, bem como do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

Sem vocês nada disso seria possível. Muito obrigado.

“Várias de nossas certezas, como os tapetes, têm que ser sacudidas vez ou outra”

(Mario Sergio Cortella)

“É preciso se perder para achar lugares que não se acham, se não todos saberiam aonde fica”

(Capitão Barbossa - Piratas do Caribe)

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”

(Isaac Newton)

RESUMO GERAL

O sistema plantio direto (SPD) é comprovadamente sustentável no cultivo de grãos, contudo, estudos apontam que a adoção do SPD pode ocasionar problemas de compactação do solo. Neste contexto, uma alternativa apresentada recentemente pela literatura para a mitigação da compactação do solo sob SPD é o preparo ocasional (PO), que consiste no preparo mecânico do solo a fim de romper as camadas compactadas. Contudo, é preciso cautela na adoção do PO, uma vez que o revolvimento do solo fere este princípio básico do SPD. Desta forma, para que a adoção do PO não desfaça os serviços ecológicos alcançados pelo SPD, é necessário um diagnóstico acurado da compactação do solo, permitindo que as intervenções mecânicas sejam feitas nos momentos em que o nível de compactação esteja comprometendo a produtividade das culturas. Do ponto de vista agrônomo, nem sempre alterações nas propriedades físicas indicam compactação do solo, visto que muitas vezes não expressam queda em produtividade das culturas. Assim, os estudos sobre compactação do solo em áreas de SPD devem relacionar os atributos diagnósticos às variações em produtividade agrícola. Na literatura não há estudos que monitoraram em longo prazo os efeitos do PO nas propriedades do solo e seus reflexos na produtividade dos cultivos. Os objetivos deste estudo foram (a) avaliar o efeito do PO e PO associado à calagem nas propriedades do solo e seus reflexos na produtividade de grãos, em longo prazo; e (b) avaliar os efeitos da frequência pré-estabelecida de subsolagem (a cada dois e a cada três anos) nas propriedades físicas do solo e na produtividade de grãos. Para isso um estudo foi conduzido em um experimento implantado em faixas no ano de 2015 na Fazenda Santa Helena, no município de Nazareno – MG, onde foram testados três implementos em diferentes frequências de PO na mitigação da compactação bem como seus reflexos na produtividade. Desta forma os tratamentos foram: NT – sistema plantio direto contínuo; NTS2 - SPD subsolado predominantemente a cada 2 anos; NTS3- SPD subsolado a cada 3 anos; NTSSL - SPD subsolado em 2015 + aplicação de calcário em superfície; NTSDL - SPD subsolado em 2015 + aplicação de calcário em profundidade; NTC – SPD escarificado até a profundidade de 26 cm em 2015. O preparo ocasional em solo sob SPD consolidado promoveu melhoria da qualidade física do solo com aumento de produtividade de grãos de duração direta de 18 meses, e algum efeito residual benéfico na produtividade no total dos 5 anos de experimento, sendo que todos os tratamentos mecanizados uma única vez apresentaram média produtiva superior ao tratamento controle, contudo a adoção de frequência de preparo pré-estabelecida se mostrou prejudicial a produtividade das culturas, uma vez que apresentou o pior desempenho produtivo no acumulado dos 9 cultivos. No momento de maior restrição hídrica do experimento foi possível evidenciar de forma mais clara as diferenças entre tratamentos. Os equipamentos utilizados na subsolagem diferiram somente na persistência dos efeitos de alívio estrutural, porém no acumulado de produção ao final do experimento, não houve diferença entre os implementos.

Palavras-chave: Preparo ocasional. Subsolador. Escarificador. Qualidade física do solo. Manejo do solo.

GENERAL ABSTRACT

The no-tillage system (NT) is proven to be sustainable in grain cultivation, however, studies indicate that the adoption of NT can cause soil compaction problems. In this context, an alternative recently presented in the literature for the mitigation of soil compaction under NT is occasional tillage (OT), which consists of mechanical soil tillage in order to break up the compacted layers. However, caution is needed in the adoption of the OT, since the soil disturbance violates this basic principle of the NT. In this way, so that the adoption of the OT does not undo the ecological services achieved by the NT, an accurate diagnosis of soil compaction is necessary, allowing mechanical interventions to be carried out at times when the level of compaction is compromising crop productivity. From an agronomic point of view, changes in physical properties do not always indicate soil compaction, as they often do not express a drop in crop productivity. Thus, studies on soil compaction in NT areas should relate diagnostic attributes to variations in agricultural productivity. There are no studies in the literature that monitored the long-term effects of OT on soil properties and its effects on crop productivity. The objectives of this study were (a) to evaluate the effect of OT and OT associated with liming on soil properties and its effects on grain yield in the long term; and (b) to evaluate the effects of the pre-established frequency of subsoiling (every two and every three years) on soil physical properties and grain yield. For this, a study was conducted in an experiment implemented in strips in the year 2015 at Fazenda Santa Helena, in the municipality of Nazareno - MG, where three implements were tested at different frequencies of OT in the mitigation of compaction as well as its reflexes on productivity. Thus, the treatments were: NT – continuous no-tillage system; NTS2 - NT subsoiled predominantly every 2 years; NTS3- NT subsoiled every 3 years; NTSSL – Subsoil NT in 2015 + surface limestone application; NTSDL - NT subsoiled in 2015 + application of limestone in depth; NTC – NT scarified to a depth of 26 cm in 2015. Occasional tillage in soil under consolidated NT promoted an improvement in the physical quality of the soil with an increase in grain yield of direct duration of 18 months, and some beneficial residual effect on total yield of the 5 years of experiment, being that all the mechanized treatments only once presented a productive average superior to the control treatment, however the adoption of pre-established frequency of preparation proved to be harmful to the productivity of the cultures, since it presented the worst productive performance in the accumulated from the 9 crops. At the time of greatest water restriction in the experiment, it was possible to show more clearly the differences between treatments. The equipment used in subsoiling differed only in the persistence of structural relief effects, but in the accumulated production at the end of the experiment, there was no difference between the implements.

Keywords: Occasional tillage. Subsoiling. Chisel plowing. Soil physical properties. Soil management.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Precipitação mensal na fazenda Santa Helena no período de outubro de 2015 a março de 2020. Os meses destacados em verde correspondem aos plantios dos cultivos avaliados durante o experimento.....42
- Figura 2.** Área experimental localizada na fazenda Santa Helena com os pontos que limitam as faixas que contém os tratamentos.....45
- Figura 3.** Correlação entre as propriedades físicas e químicas do solo e a produtividade de grãos no cultivo da soja 2015/16 e no cultivo do milho 2019/20 nas profundidades de 0-0,05 e 0,25-0,30 m.....50
- Figura 4.** Produtividade das culturas para cada um dos cultivos avaliados.....52
- Figura 5.** Diferença relativa na receita líquida para cada tratamento de OT em comparação ao tratamento controle sob plantio direto sem intervenção mecânica no acumulado de cinco anos.....54

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Cultivares, datas de plantio e adubações realizadas nos cultivos avaliados durante a condução do experimento.....43
- Tabela 2.** Propriedades físicas e químicas do solo nas faixas dos tratamentos nos cultivos de 2015/16 e 2019/20.....48

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Produção de grãos no Brasil e Sistema Plantio Direto	14
2.2 Compactação do solo em sistemas plantio direto	15
2.2.1. <i>Compactação do solo em áreas de incorporação ao sistema de plantio direto</i>	17
2.2.2 <i>Compactação do solo em áreas de plantio direto consolidados</i>	18
2.3 Diagnóstico da compactação	19
2.3.1 <i>Propriedades físicas do solo utilizadas no diagnóstico da compactação</i>	19
2.4 Métodos de descompactação do solo	21
2.4.1 <i>Escarificação e subsolagem</i>	22
2.4.2. <i>Eficiência da descompactação do solo por métodos mecânicos</i>	23
3. REFERÊNCIAS	24
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	37
EFEITO DO PREPARO OCASIONAL NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SEUS REFLEXOS NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS SOB PLANTIO DIRETO	38
1.Introdução	40
2.Materiais e métodos	42
2.1. <i>Descrição da área experimental</i>	42
2.2 <i>Tratamentos</i>	44
2.3 <i>Amostragens e Avaliações</i>	45
2.4 <i>Análise estatística</i>	46
3.Resultados	47
3.1 <i>Propriedades físicas e químicas do solo</i>	47
3.2 <i>Produtividade das culturas</i>	51
4. Discussão	54
4.1 <i>Efeitos do OT na nas propriedades do solo e seus reflexos na produtividade</i>	54
4.2 <i>Efeitos da frequência pré-estabelecida de subsolagem nas propriedades do solo e na produtividade de grãos</i>	58
5. Conclusões	59
6. Referências bibliográficas	60

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) é uma importante estratégia de manejo conservacionistas para a agricultura, que une potencial produtivo e viabilidade econômica à conservação dos solos cultivados, uma vez que reduz custos de produção e promove melhorias na qualidade física dos solos. O SPD está difundido em várias partes do globo, provando ser possível sua prática em condições contrastantes de solo, clima e relevo (DERPSCH et al., 2010). Cerca de 180 milhões de hectares no mundo se encontram sob SPD (KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2019), enquanto no Brasil o número chega a 32 milhões de hectares (IBGE, 2017), sendo boa parte ocupado com o cultivo de milho e soja (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2020).

Apesar dos inúmeros benefícios observados, estudos relatam problemas de compactação do solo em SPD no Brasil e em outros países (NUNES et al., 2015; BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018; SCHLÜTER et al., 2018; PEIXOTO et al., 2019b; POTT et al., 2019). É provável que haja compactação do solo em áreas sob SPD contínuo, isto é, adoção desse sistema por vários anos, visto que continuam acontecendo operações mecanizadas na área que não o revolvimento do solo, tais como plantios, adubações, pulverizações e colheitas, hoje indispensáveis para a eficiência da atividade agrícola. A pressão exercida pelos rodados dos implementos agrícolas sobre o solo tem grande influência no fenômeno observado (HAMZA; ANDERSON, 2005; KELLER et al., 2019; YADAV; LAL; MEENA, 2020), sobretudo quando as operações são realizadas em condições inadequadas de umidade do solo (SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, 1994; BATEY, 2009). Além do tráfego de máquinas, para as causas da compactação do solo destacam-se a ausência ou ineficiência da rotação de culturas, o pastejo intensivo e o manejo inadequado do solo com operações de preparo (HAMZA; ANDERSON, 2005), resultando em menor produção de palhada e acúmulo de matéria orgânica no solo (MOREIRA, 2019).

A compactação do solo é responsável por reduções na produtividade agrícola, podendo ser responsável por até 75% de perdas (KELLER et al., 2019), devido ao aumento da resistência mecânica, redução na aeração e capacidade de infiltração de água, afetando negativamente o desenvolvimento radicular das plantas, bem como a dinâmica de absorção de água e nutrientes (HAMZA; ANDERSON, 2005; KELLER et al., 2019). A compactação do solo é caracterizada

pela redução no volume de poros e consequente aumento na densidade do solo (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008).

Nas áreas consolidadas sob SPD o preparo ocasional ou estratégico tem sido apresentado como uma alternativa para a mitigação de problemas decorrentes do uso contínuo do sistema, como a compactação do solo (WANG et al., 2014; LOZANO et al., 2016; BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO et al., 2020; SCHLEGEL; HOLMAN; ASSEFA, 2020). O preparo ocasional consiste no preparo do solo, muitas vezes utilizando-se arados, grades, escarificadores e subsoladores, a fim de romper as camadas compactadas, auxiliar o controle de pragas e plantas daninhas e incorporar corretivos, fertilizantes e compostos orgânicos. Entretanto é preciso cautela para adoção do preparo ocasional, visto que o revolvimento do solo fere um dos princípios do sistema, e pode facilitar a perda de solo por erosão e redução da matéria orgânica (MELERO et al., 2011; BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020). Subsoladores e escarificadores tem apresentado vantagens em relação ao uso de arados e grades por melhorar as propriedades biológicas do solo e preservar o estoque de carbono, além de apresentarem maior profundidade efetiva de trabalho (PEIXOTO et al., 2020).

No contexto de incorporação de novas áreas ao SPD, o sucesso em produtividade depende do conhecimento do histórico da área, para que sejam mitigados possíveis problemas de compactação antes do cultivo, sobretudo quando a mesma foi utilizada anteriormente para pastejo animal ou apresenta sinais de degradação. Segundo a Embrapa (2020a), 65% das pastagens brasileiras, nativas ou implantadas, necessitam de intervenção para reverter o estado de degradação em que se encontram. Considerando que é comum a expansão de áreas de produção de grãos sob áreas anteriormente com pastagens degradadas (AULER et al., 2019) e que a conversão de pastagens degradadas em áreas produtivas pode reduzir a perda de solo por erosão e o avanço da agricultura sobre áreas nativas (MERTEN; MINELLA, 2013), faz-se necessário o adequado diagnóstico de compactação para orientar a tomada decisão quanto ao manejo do solo. Por outro lado, nas áreas consolidadas sob SPD, é possível que a produtividade agrícola apresente queda ao longo das safras, devido ao aumento gradual na densidade do solo após as intervenções mecânicas na implantação (DRESCHER et al., 2011; FIDALSKI; YAGI; TORMENA, 2015; DANG et al., 2018). Para ambos os casos, visto o elevado custo das operações de subsolagem ou escarificação, é importante que se faça um correto diagnóstico da compactação, para que se defina a necessidade da operação, bem como o melhor momento para fazê-la.

O diagnóstico da compactação pode ser feito das seguintes formas: indiretamente, observando-se a produtividade das culturas ao longo das safras; visualmente em campo; quantitativa, utilizando-se de propriedades físicas do solo como indicadores. Um dos indicadores mais comumente utilizados para o diagnóstico da compactação do solo é a resistência mecânica do solo à penetração de raízes (RP), especialmente devido a praticidade em campo e ao baixo custo operacional, obtida através de penetrômetros de ponta cônica (HARTGE et al., 1985; HERRICK; JONES, 2002; BECKETT et al., 2018), entretanto, tal indicador sofre grande influência da condição de umidade do solo. A fim de padronizar as avaliações e amenizar tais efeitos, é indicado que as avaliações sejam realizadas com o solo na capacidade de campo (VAZ et al., 2011; MOME FILHO et al., 2014). Porém, Peixoto et al. (2019a) sugerem uma metodologia para diagnóstico da compactação com base em modelos de RP obtidos com o solo um pouco mais seco do que aquele na capacidade de campo, a fim de se evitar falsos negativos à compactação do solo.

Do ponto de vista agronômico, nem sempre alterações nas propriedades físicas, indicam compactação do solo, visto que muitas vezes tais alterações não expressam queda em produtividade agrícola (ARVIDSSON; HÅKANSSON, 2014). Desta forma, os estudos sobre compactação do solo em áreas de SPD devem relacionar os atributos diagnósticos às variações em produtividade agrícola, a fim de se estabelecer valores críticos para a intervenção mecânica que retornem as melhores respostas econômicas. Além disso, é importante avaliar o tempo de persistência dos efeitos obtidos pela mecanização, bem como a eficiência dos preparos adotados em áreas recém incorporadas, e consolidadas sob SPD.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Produção de grãos no Brasil e Sistema Plantio Direto

Parte significativa da área agricultável do Brasil encontra-se sob produção de grãos, chegando a 65,9 milhões de hectares plantados no ano agrícola de 2019/20 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2020). Dentre os principais produtos se destacam a soja (36,9 milhões de ha), milho (18,5 milhões de ha), Feijão (2,9 milhões de ha) trigo (2,3 milhões de ha) e algodão em caroço (1,6 milhões de ha), que somadas às demais culturas forneceram um incremento de 4,2% de área total cultivada em comparação a safra anterior, levando a um desempenho recorde estimado em 257,8 milhões de toneladas de grãos produzidos no ano agrícola 2019/20, sendo o milho e a soja responsáveis por 88% desta produção (COMPANHIA

NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2020). A evolução tecnológica e os esforços científicos em parceria com os produtores, levaram o Brasil a uma posição de destaque no cenário agrícola mundial, especialmente graças a expansão na produção de grãos (AZEVEDO et al., 2008). Dentre os estados produtores, os que lideram a produção nacional são: Mato Grosso (29%), Paraná (15,9%), Goiás (10,6%) e Rio Grande do Sul (10,4%). Minas Gerais aparece em 6º lugar na produção de grãos por Estado, correspondendo no cenário nacional a 5,9% do total produzido e 5,2 % de área plantada (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2020).

Segundo a EMBRAPA (2020b), 70% da produção de grãos no Brasil encontra-se sob Sistema Plantio Direto (SPD). Isso se tornou possível graças ao investimento em pesquisas para desenvolvimento de implementos e defensivos que se ajustassem a este modelo de produção (DERPSCH et al., 2010). O SPD tem sido cada vez mais utilizado na agricultura, sobretudo em áreas de cultivo anual, a fim de se obter boa produtividade unida à sustentabilidade agrícola dos solos (SCHERER; BALDISSERA; NESI, 2007), além de ter se tornado uma importante ferramenta na manutenção e recuperação da capacidade produtiva em áreas degradadas (TORRES; PEREIRA; FABIAN, 2008).

Esse sistema de manejo tem como princípios o mínimo revolvimento do solo, a manutenção da cobertura morta e a diversificação das plantas cultivadas (KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2019; FAO, 2020). Se mostra um sistema de cultivo bem estabelecido, estando presente em regiões distintas do globo (DERPSCH et al., 2010). Dentre os benefícios observados pela adoção do SPD é possível destacar a economia de combustíveis fósseis (FILIPOVIC et al., 2006; YADAV et al., 2020), melhor aproveitamento da água no solo (VERHULST et al., 2011; DAIGH et al., 2018), redução da erosão (GRANDY; ROBERTSON; THELEN, 2006; KUROTHE et al., 2014), aumento da atividade microbiana (ZHANG et al., 2015) bem como do conteúdo de matéria orgânica nas camadas superficiais (DEVINE et al., 2014; SINGH et al., 2014), além de melhorias em atributos do solo como agregação (DEVINE et al., 2014; FIORINI et al., 2020), porosidade, condutividade hidráulica (EZE et al., 2020) e taxa de infiltração básica (THIERFELDER; WALL, 2009).

2.2 Compactação do solo em sistemas plantio direto

Mesmo o SPD apresentando diversos benefícios, nota-se redução na produtividade das culturas, podendo ser relacionada à compactação do solo. Isso vêm ocorrendo sobretudo em áreas estabelecidas a longo tempo ou em solos de textura mais argilosa (NUNES et al., 2015;

SCHLÜTER et al., 2018; POTT et al., 2019), ou mesmo em áreas recentemente incorporadas, onde problemas de compactação do solo não foram devidamente resolvidos (MOREIRA, 2019; DE MOURA et al., 2021). A profundidade de ocorrência da compactação depende do histórico de uso e manejo da área, em geral ocorrendo entre 7 e 15 cm de profundidade (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

A compactação do solo é caracterizada pela redução do volume de poros, resultando em aumento da densidade (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008) pode ainda ser definida como o momento em que as pressões exercidas sobre o solo superam a capacidade de suporte de carga (DIAS JUNIOR; TASSINARI, 2019). De forma geral é importante que o solo apresente boa estrutura e coesão (BOUWMAN; ARTS, 2000; SEVERIANO et al., 2011), para que haja interação entre as partículas do solo e o sistema radicular das plantas. Porém, quando o manejo do solo promove um aumento excessivo na densidade, o desenvolvimento radicular fica comprometido e há uma queda na produtividade das culturas (KAN et al., 2020; MORAES et al., 2020). Assim, é importante destacar que as respostas em produtividade dos cultivos ao grau de compactação tem comportamento parabólico/polinomial quadrático, o que significa dizer que do ponto de vista agrônomo, nem sempre o aumento de densidade do solo e redução da porosidade indica que o solo está compactado bem como reduções na densidade e aumento da porosidade irão necessariamente resultar em resposta positiva na planta (ARVIDSSON; HÅKANSSON, 2014). Logo, o acurado diagnóstico da compactação se faz necessário para identificar a condição de compactação que leva a resposta negativa nas plantas, bem como o alívio da compactação que promove efeito positivo.

A compactação é considerada a principal forma de degradação física do solo, visto que sob essa condição há uma redução na capacidade de infiltração de água, promovendo aumento da erosão hídrica por escoamento superficial (HORN et al., 1995; KELLER et al., 2013; LAL, 2015). Além disso, reduz a atividade microbiana do solo, a capacidade de ciclagem e a absorção de nutrientes pelas plantas, e promove aumento da emissão de gases do efeito estufa (FREY et al., 2009, 2011; BEYLICH et al., 2010; HARRISON-KIRK et al., 2015; KELLER et al., 2019).

Cada solo apresenta uma suscetibilidade particular à compactação. Tal característica é influenciada pela textura, sendo que solos mais argilosos tendem a ser mais suscetíveis a compactação (HORN et al., 1995). O conteúdo de matéria orgânica (MO) também influencia diretamente a suscetibilidade do solo à compactação, desta forma, solos com maior conteúdo de MO são mais resilientes (SOANE, 1990; HAMZA; ANDERSON, 2005). O volume de poros também é afetado positivamente pela MO, seja pela grande influência no processo de formação

e estabilização dos agregados (BARRAL; ARIAS; GUÉRIF, 1998; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011; SILVA et al., 2014) ou ainda devido a decomposição da mesma, a exemplo de raízes mortas que se tornam caminhos de crescimento para as raízes da cultura seguinte, fluxo de água e nutrientes (ZHANG et al., 2020).

A compactação é provocada por ações antrópicas, muitas vezes relacionadas ao manejo adotado (PIRES et al., 2017) e operações mecanizadas (KELLER et al., 2019; MORAES et al., 2020). O sistema de manejo interfere diretamente na compactação do solo. Sistemas conservacionistas melhoram a estabilidade de agregados e assim preservaram a estrutura e alteram o sistema poroso do solo quando comparado a sistemas convencionais (PAGLIAI; VIGNOZZI; PELLEGRINI, 2004). Entretanto, é comum se observar um aumento na densidade dos solos cultivado sob sistemas conservacionistas, especialmente na camada superficial, comportamento contrário aos sistemas convencionais onde a compactação é observada mais comumente em subsuperfície (HÅKANSSON; VOORHEES; RILEY, 1988; BERTOL et al., 2000, 2004; ALBUQUERQUE; SANGOI; ENDER, 2001).

2.2.1. Compactação do solo em áreas de incorporação ao sistema de plantio direto.

O sucesso do SPD depende do momento de incorporação da área e da qualidade do sistema adotado no momento inicial, desta forma é importante que um levantamento do histórico da área seja feito, para que possíveis problemas como compactação e acidez sejam mitigados antes da implantação, especialmente se a área a ser incorporada tenha sido utilizada anteriormente como pastagem ou apresenta sinais de degradação. A área total sob cultivo de grãos no Brasil cresceu 80% entre os anos de 1996 e 2006, ao passo que a área sob pastagem decresceu em todos os Estados brasileiros, exceto na Amazônia (MERTEN et al., 2009), indicando um avanço das áreas de cultivo de grãos sobre as áreas de pastagem. Segundo a EMBRAPA (2020a), 130 dos 200 milhões de hectares de pastagens do Brasil, nativas ou implantadas, necessitam de alguma intervenção para reverter processos de degradação.

Embora existam poucos estudos que avaliem as alterações imediatas nas propriedades físicas do solo em SPD, é observado que a suscetibilidade à compactação dos solos sob SPD é maior do que aqueles sob cultivo convencional (CV) nos primeiros anos, porém essa diferença diminui com o tempo, possivelmente devido ao acúmulo de matéria orgânica em SPD (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018). Moraes et al. (2020) observaram melhorias nas condições físicas do solo nos primeiros anos de adoção do SPD devido a rotação de culturas e consórcio com braquiária, enquanto dos Santos et al. (2019) evidenciaram o potencial da braquiária em

aumentar os estoques de C do solo. Desta forma, favorecer o aporte orgânico em SPD é vital para o sucesso da incorporação de novas áreas. De Moura et al. (2021) observaram melhorias nas condições físicas do solo, promovidas pela rotação milho/soja em consórcio com braquiária, e apontam que a disponibilidade de nutrientes e as propriedades químicas do solo tiveram menos impacto na produtividade do que as propriedades físicas do solo.

Reichert et al. (2016) apontaram queda no conteúdo de matéria orgânica e aumento na porosidade total, além de aumento na suscetibilidade do solo a compactação logo após o revolvimento em áreas incorporadas ao SPD, especialmente nas camadas mais superficiais do solo, além de reduzir a permeabilidade de água devido a obstrução de poros. Contudo, tais efeitos começaram a ser amenizados após 5 anos de adoção do SPD (REICHERT et al., 2016).

2.2.2 Compactação do solo em áreas de plantio direto consolidados

Em áreas de sistema plantio direto consolidadas pode-se observar problemas com compactação, especialmente após longo período de implantação do sistema (REICHERT et al., 2009; BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018; PEIXOTO et al., 2019a, 2020; BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020). Apesar de não haver revolvimento do solo em SPD, muitas operações mecanizadas são frequentemente essenciais para a eficiência e lucratividade da atividade agrícola em larga escala, como plantios, adubações, pulverizações e colheitas. Ao longo dos anos o peso das máquinas agrícolas aumentou significativamente, intensificando a compactação do solo, afetando negativamente a produtividade agrícola (KELLER et al., 2019). Em muitas áreas mecanizadas é comum se observar camadas compactadas provocadas pelos rodados das máquinas utilizadas na operação (RAPER, 2005; YADAV; LAL; MEENA, 2020). Além do efeito do tráfego de máquinas, a ausência ou ineficiência da rotação de culturas e o manejo inadequado do solo podem favorecer a compactação (HAMZA; ANDERSON, 2005) reduzindo a produção de palhada e o aporte orgânico no solo (MOREIRA, 2019).

Algumas medidas podem amenizar a compactação que, inevitavelmente as operações mecânicas provocam nas areias sob SPD, tais como: monitoramento da umidade no momento da operação, controle do tráfego das máquinas e uso de máquinas leves, respeitando o limite de carga por rodado (HAMZA; ANDERSON, 2005; TULLBERG; YULE; MCGARRY, 2007; MCPHEE et al., 2020).

2.3 Diagnóstico da compactação

Um dos sinais agronômicos de que uma área apresenta problemas de compactação é a queda na produtividade das lavouras e a redução do potencial produtivo dos cultivos, o que pode ser identificado pelo monitoramento da lavoura com sensores de produtividade acoplados às colhedoras (SANTI et al., 2013), identificando zonas de produtividade (SANTI et al., 2012, 2016). Essas zonas de produtividade podem ser identificadas também indiretamente por meio de índices de vegetação obtidos por sensores proximais e remotos, como também embarcados em veículos aéreos não tripulados (ZHOU et al., 2020). Outros sinais agronômicos da compactação podem ser doenças associadas à patógenos de solo e ineficiência da absorção de nutrientes (BOUWMAN; ARTS, 2000; WANG et al., 2019), visto que ambos alteram índices de vegetação (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2020; LEMES et al., 2020) e podem assim ser utilizados para direcionar amostragens para o diagnóstico da compactação com análises físicas do solo.

Em campo, a identificação de camadas compactadas pode ser realizada por meio do diagnóstico visual da estrutura em campo, a exemplo dos métodos Perfil Cultural adaptado por Tavares Filho et al (1999), Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) proposto por Ralisch et al. (2017) e *Visual Evaluation of Soil Structure* (VESS) proposto por Ball, Batey e Munkholm (2007). Entretanto tais métodos ainda são pouco utilizados por técnicos agrícolas, sendo seu uso mais restrito à pesquisa (PAIVA; RITA; CAVALIERI-POLIZELI, 2020). Destacam-se ainda que são métodos qualitativos ou semi-quantitativos, o que dificulta a clareza da tomada de decisão quanto a recomendação ou não de um preparo ocasional do solo para alívio de compactação. Nesse sentido, análises quantitativas da estrutura do solo permitem a verificação da sua qualidade física para o crescimento e produtividade de plantas. Para tal, são utilizadas propriedades do solo variáveis de acordo com o estado de compactação do solo, avaliados em laboratório majoritariamente (KARLEN, 2004; REICHERT et al., 2009; DIAS JUNIOR; TASSINARI, 2019; PEIXOTO et al., 2019a).

2.3.1 Propriedades físicas do solo utilizadas no diagnóstico da compactação

A densidade do solo (DS) relaciona a massa do solo seco ao seu volume total, e é um dos parâmetros mais utilizados para a determinação da compactação do solo (PANAYIOTOPOULOS; PAPADOPOULOU, 1994). Existe uma correlação negativa entre o

volume de poros e a DS (SILVA et al., 2008; NAWAZ; BOURRIÉ, 2013; BATISTA et al., 2019), visto que o aumento da DS envolve um rearranjo nas partículas do solo, preenchendo de sólidos o que antes eram espaços vazios. Embora seja possível encontrar na literatura valores de densidade crítica ao desenvolvimento das culturas (DSC) preestabelecidos (DE LIMA et al., 2007), para cada tipo de solo existe uma densidade crítica ao crescimento das plantas, que é variável em função da estrutura, textura, mineralogia e da própria planta cultivada (HAKANSSON, 1990; HAKANSSON; LIPIEC, 2000; REICHERT et al., 2009). Para determinação da densidade do solo em laboratório é utilizado o método do anel volumétrico (KLUTE, 1986) como padrão, e esses valores são utilizados para monitoramento da evolução da compactação do solo, especialmente associados ao grau de compactação do solo (GC).

O grau de compactação (GC) ou densidade relativa é um indicador que relaciona a densidade momentânea do solo à densidade máxima que o solo pode atingir, obtida através do teste de Proctor ou teste de compressão uniaxial com compressão de 200 kilopascal (kPa) (HAKANSSON, 1990; HAKANSSON; LIPIEC, 2000). Tal indicador permite uma visualização da faixa ótima de densidade para o cultivo. Vem sendo relatado na literatura que valores de GC em torno de 85% correspondem a produtividade máxima das culturas (CARTER, 1990; HAKANSSON, 1990; BEUTLER et al., 2005; ARVIDSSON; HÅKANSSON, 2014).

A porosidade do solo (PT) corresponde aos espaços vazios do solo, que podem ser preenchidos por ar ou água. Ao passo que a compactação do solo se intensifica, há uma redução no volume de poros, especialmente naqueles de maior tamanho, mais facilmente destruídos (KOOISTRA; TOVEY, 1994). A redução na porosidade de aeração do solo pode afetar significativamente o desenvolvimento das culturas. Por outro lado, quando a porosidade atinge níveis muito elevados, onde o contato entra as raízes e o solo fica limitado, o desenvolvimento das plantas pode ser prejudicado (KOOISTRA et al., 1992; HÅKANSSON; STENBERG; RYDBERG, 1998). A macroporosidade, portanto, por princípio, é um importante indicador da compactação, na qual valores abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 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).

O crescimento radicular é comprometido pela compactação, uma vez que as raízes crescem preferencialmente nos espaços porosos ou em locais que ofereçam menor resistência, sendo que quando os poros são menores do que o diâmetro radicular, é necessário uma força para deformar o solo (BENGOUGH; MULLINS, 1990). A resistência mecânica do solo a penetração de raízes (RP) é comumente utilizada para a avaliação da compactação do solo e

pode ser avaliada em campo por meio de penetrômetros de cone dinâmicos (STOLF et al., 2011; VAZ et al., 2011; BECKETT et al., 2018), penetrômetros estáticos semiautomáticos, ou, penetrômetros eletromecânicos de bancada (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; SERAFIM; VITORINO, 2008; MORAES et al., 2014). A RP é influenciada diretamente pela umidade do solo (WHALLEY et al., 2005; REICHERT et al., 2009; WHITMORE; WHALLEY, 2009) e tende a diminuir exponencialmente no sentido do aumento da umidade (MOME FILHO et al., 2014). Peixoto et al (2019a) propuseram um método de diagnóstico da compactação utilizando a RP, de forma a minimizar os efeitos que a umidade exerce sobre o atributo, realizando as avaliações com o solo mais seco que a capacidade de campo, evitando falsos negativos a compactação do solo.

O método proposto por (PEIXOTO et al., 2019a) consiste nas seguintes etapas: (1) escolha de uma área referência, preferencialmente em mesmo tipo de solo e textura, que apresente alta produtividade dentro da fazenda, que será considerada como condição ótima para o cultivo; (2) amostragem da área de referência e criação de modelos ótimos (de referência) de resistência mecânica a penetração radicular (RP) em função do conteúdo de água no solo; (3) avaliações de penetrometria das áreas suspeitas de compactação em amostras indeformadas coletadas na camada mais restritiva, indicado pela penetrometria em campo; (4) plotagem dos valores de RP da área suspeita sobre os modelos gerados na área de referência, e por meio de comparação indicar a necessidade de intervenção mecânica. As coletas para criação do modelo de referência devem ser nas mesmas profundidades das coletas realizadas na área sob suspeita de compactação. Esse método ainda não foi testado em diferentes condições dos quais foi proposto, como em solos de classes texturais diferentes.

2.4 Métodos de descompactação do solo

A planta é o principal agente de descompactação do solo, sendo ela a responsável pela reestruturação, aumento da porosidade, devido a atividade radicular, e melhoria da biodiversidade e aporte orgânico. O crescimento radicular interfere diretamente na porosidade e conectividade dos poros, afetando a permeabilidade do solo de acordo com a densidade de raízes (LU et al., 2020). As estratégias que envolvem o uso de plantas podem ser a rotação, sucessão ou consórcio com outras culturas ou plantas de cobertura que possuem sistema radicular agressivo. Pacheco et al. (2015) observaram a influência do uso de crotalária na redução da densidade do solo. A adoção do cultivo de gramíneas, como a braquiária, em consórcio e sucessão com soja e milho, tem se mostrado uma alternativa para alívio da

compactação do solo mesmo na fase inicial do plantio direto (DE MOURA et al., 2021). Mesmo entre as gramíneas há muita diferença quanto a capacidade de recuperação física como demonstrado por Flávio Neto et al. (2015) e Galdos et al. (2020).

Contudo, quando a compactação do solo atinge um estágio no qual o crescimento das plantas é considerado ineficiente, o preparo mecânico do solo se faz importante estratégia de ruptura de camadas compactadas. Ainda, a intervenção mecânica no solo pode ser justificada quando a situação de compactação observada pelos indicadores físicos é grave. Em SPD, muitos pesquisadores têm sugerido o uso do preparo ocasional ou estratégico, que consiste no revolvimento do solo apenas em ocasiões de intensa compactação, onde a produtividade das culturas apresenta declínio ao longo das safras (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO et al., 2020). Tais operações são feitas por implementos com capacidade de romper a camada compactada do solo, sendo os arados, grades, escarificadores e subsoladores os mais frequentemente utilizados, e a escolha dos implementos está associada à profundidade de trabalho alcançada por cada equipamento e tipo de efeito esperado. Subsoladores e escarificadores tem apresentado vantagens em relação ao uso de arados e grades por melhorar as propriedades biológicas do solo e preservar o estoque de carbono, além de apresentarem maior profundidade efetiva de trabalho e promover menor erosão (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO et al., 2020). Apesar do uso de subsoladores apresentar aumento acentuado em produtividade agrícola, poucos estudos avaliam o uso de subsoladores em preparo ocasional (PEIXOTO et al., 2020). Desta forma, o presente trabalho dá foco aos efeitos de preparo ocasional promovidos pelo uso de subsoladores e escarificadores.

2.4.1 Escarificação e subsolagem

O escarificador é um equipamento de preparo do solo composto por hastes, que atua rompendo as camadas do solo sem a inversão da leiva, sendo assim 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). A escarificação do solo tem como finalidade o aumento da rugosidade do solo, aumento da porosidade e redução na compactação do solo (KOCHHANN, R. A, DENARDIN, 2000).

Assim como a escarificação, o método de subsolagem é utilizado para romper as camadas compactadas de forma a não inverter a leiva, porém é mais utilizado quando as camadas restritivas se encontram em maiores profundidades (>0,40 m) (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008) ou oferecem maior resistência aos implementos, visto que

suas hastes são de maior tamanho. Se tornou uma técnica de manejo comumente utilizada, a fim de romper camadas compactadas em profundidade e facilitar a percolação de água e penetração radicular (BATEMAN; CHANASYK, 2001).

2.4.2. Eficiência da descompactação do solo por métodos mecânicos

O sucesso dos métodos mecânicos na mitigação da compactação está atrelado especialmente a escolha correta do implemento e a umidade do solo no momento da operação (KOCHHANN, R. A, DENARDIN, 2000). Após a operação mecânica é esperado que as propriedades físicas do solo que antes indicavam uma condição de compactação, agora sugiram uma melhor condição para o cultivo.

O uso da escarificação na descompactação do solo pode gerar respostas positivas em produtividade (KLEIN et al., 2008; CALONEGO et al., 2017) negativas (DEBIASI et al., 2010), ou ainda não promover nenhuma alteração (KLEIN; CAMARA, 2007; SEKI et al., 2015). A permanência dos efeitos promovidos pelo uso de escarificadores não é igual para todos os atributos físicos do solo, mas no geral dura de 6 a 30 meses, indicando que há uma reconsolidação do solo com o tempo (VIEIRA; KLEIN, 2007; MAHL et al., 2008; DRESCHER et al., 2011, 2016).

A subsolagem vem sendo estudada para descompactação do solo em plantio direto, apresentando melhorias em produtividade e nos atributos do solo como porosidade e densidade (QIN et al., 2008; WANG et al., 2014; ZHANG et al., 2017; PEIXOTO et al., 2019a, 2020). Porém, assim como na escarificação, os efeitos são efêmeros, sendo necessárias novas operações após algum tempo.

A densidade, porosidade total e resistência do solo à penetração são notadamente afetadas pelo preparo ocasional. Contudo, a permanência dos efeitos promovidos podem não ser observados por muitas safras após as operações (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020). De maneira geral, a utilização de escarificadores e subsoladores preservam o estoque de carbono no solo e promovem menos erosão quando comparados ao uso de arados e grades, devido ao menor revolvimento do solo, especialmente em superfície (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO et al., 2020).

Peixoto et al. (2020) observaram que as melhores respostas em produtividade decorrente do uso de preparo ocasional (PO) ocorreram em regiões temperadas e climas secos, quando a

operação foi feita em SPD transicional (5 – 10 anos de implantação do sistema) e em solos com teor de argila menor $\leq 35\%$.

Os efeitos observados pelo uso de escarificadores bem como as respostas em produtividade são melhor conhecidos no Brasil, sobretudo em regiões com mais tempo de SPD. Por outro lado, existe uma demanda por conhecimento acerca do uso de subsoladores na mitigação da compactação do solo em SPD, porém, ainda há pouca pesquisa desenvolvida sobre os efeitos obtidos pela operação. Considerando ainda que as condições climáticas e pedológicas (PEIXOTO et al., 2020) afetam a eficiência do preparo ocasional. Estudos em diferentes solos e regiões são demandados para orientar técnicos e produtores tanto a tomada de decisão quanto ao uso dessa estratégia de manejo do solo. Nesse contexto, o diagnóstico da compactação com exatidão é fundamental, visando assim maior resposta das plantas em crescimento e produtividade bem como menos danos aos serviços ecossistêmicos prestados pelo solo.

3. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 717–723, 2001. doi: 10.1590/s0100-06832001000300021.

ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. Response of different crops to soil compaction-Short-term effects in Swedish field experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 138, p. 56–63, 2014. doi: 10.1016/j.still.2013.12.006.

AULER, A. C.; CAIRES, E. F.; PIRES, L. F.; GALETTO, S. L.; ROMANIW, J.; CHARNOBAY, A. C. Lime effects in a no-tillage system on Inceptisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 16, p. e00206, 2019. doi: 10.1016/j.geodrs.2019.e00206.

AZEVEDO, L. F.; OLIVEIRA, T. P.; PORTO, A. G.; SILVA, F. S. A Capacidade Estática De Armazenamento De Grãos No Brasil. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 14, 2008.

BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, n. December, p. 9, 2007. doi: 10.1111/j.1473-2743.2007.00102.x.

BARRAL, M. T.; ARIAS, M.; GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 46, n. 3–4, p. 261–272, 1998. doi: 10.1016/S0167-1987(98)00092-0.

BATEMAN, J. C.; CHANASYK, D. S. Effects of deep ripping and organic matter amendments on Ap horizons of soil reconstructed after coal strip-mining. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 81, n. 1, p. 113–120, 2001. doi: 10.4141/S00-105.

- BATEY, T. Soil compaction and soil management - A review. **Soil Use and Management**, v. 25, n. 4, p. 335–345, 2009. doi: 10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x.
- 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.
- 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.
- BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v. 41, n. 3, p. 341–358, 1990. doi: 10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Physical soil properties of conventional tillage and no-tillage, in crop rotation and succession, compared with natural pasture. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 1, p. 155–163, 2004. doi: 10.1590/s0100-06832004000100015.
- BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 555–560, 2000. doi: 10.1590/S0103-90162001000300018.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 843–849, 2005. doi: 10.1590/s0100-06832005000600002.
- BEYLICH, A.; OBERHOLZER, H. R.; SCHRADER, S.; HÖPER, H.; WILKE, B. M. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. **Soil and Tillage Research**, v. 109, n. 2, p. 133–143, 2010. doi: 10.1016/j.still.2010.05.010.
- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, n. March, p. 164–200, 2018. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.03.011.
- 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. doi: 10.1016/j.still.2019.104534.
- BOUWMAN, L. A.; ARTS, W. B. M. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. **Applied Soil Ecology**, v. 14, n. 3, p. 213–222, 2000. doi: 10.1016/S0929-1393(00)00055-X.
- CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; BARTH, G. Surface Application of Lime for Crop Grain Production Under a No-Till System. **Agronomy Journal**, v. 97, 2005.
- CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P. G.; OLIVEIRA NETO, L. de; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, 2017. doi: 10.1016/j.eja.2017.02.001.

- CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 242–249, 2010. doi: 10.1016/j.eja.2010.06.002.
- CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 70, n. 3, p. 425–433, 1990. doi: 10.4141/cjss90-042.
- CARVALHO, I. R.; KORCELSKI, C.; PELISSARI, G.; HANUS, A. D.; ROSA, G. M. DA. Demanda hídrica das culturas de interesse agrônômico. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 969–985, 2013.
- CECAGNO, D.; DE ANDRADE COSTA, S. E. V. G.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; MARTINS, A. P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; BALERINI, F.; FINK, J. R.; DE FACCIO CARVALHO, P. C. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 54–62, 2016. doi: 10.1016/j.still.2015.10.005.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim da Safra de Grãos: Acompanhamento da safra 2029/20 brasileira de grãos - 12º levantamento** Brasília, DF, set. 2020. .
- CONYERS, M.; VAN DER RIJT, V.; OATES, A.; POILE, G.; KIRKEGAARD, J.; KIRKBY, C. The strategic use of minimum tillage within conservation agriculture in southern New South Wales, Australia. **Soil and Tillage Research**, v. 193, n. March, p. 17–26, 2019. doi: 10.1016/j.still.2019.05.021.
- CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. da S.; DE MOURA, M. R. D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. de J. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1207–1216, 2011. doi: 10.1590/S0100-06832011000400014.
- DAIGH, A. L. M.; DICK, W. A.; HELMERS, M. J.; LAL, R.; LAUER, J. G.; NAFZIGER, E.; PEDERSON, C. H.; STROCK, J.; VILLAMIL, M.; MUKHERJEE, A.; CRUSE, R. Yields and yield stability of no-till and chisel-plow fields in the Midwestern US Corn Belt. **Field Crops Research**, v. 218, n. April 2017, p. 243–253, 2018. doi: 10.1016/j.fcr.2017.04.002.
- DANG, Y. P.; BALZER, A.; CRAWFORD, M.; RINCON-FLOREZ, V.; LIU, H.; MELLAND, A. R.; ANTILLE, D.; KODUR, S.; BELL, M. J.; WHISH, J. P. M.; LAI, Y.; SEYMOUR, N.; CARVALHAIS, L. C.; SCHENK, P. Strategic tillage in conservation agricultural systems of north-eastern australia: Why, where, when and how? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 2, p. 1000–1015, 2018. doi: 10.1007/s11356-017-8937-1.
- 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. **Ciência Rural**, v. 37, n. 4, p. 1166–1169, 2007. doi: 10.1590/s0103-84782007000400042.
- DE MOURA, M. S.; SILVA, B. M.; MOTA, P. K.; BORGHI, E.; DE RESENDE, A. V.; ACUNA-GUZMAN, S. F.; ARAÚJO, G. S. S.; DA SILVA, L. de C. M.; DE OLIVEIRA, G. C.; CURTI, N. Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till

compaction and improve least limiting water range in a Ferralsol. **Agricultural Water Management**, v. 243, 2021. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106523.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 603–612, 2010. doi: 10.1590/S0100-204X2010000600010.

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. doi: 10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025.

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. doi: 10.1371/journal.pone.0084988.

DIAS JUNIOR, M. D. souza; TASSINARI, D. COMPACTAÇÃO DO SOLO – ATUALIZAÇÃO. In: **Tópicos em ciência do solo volume10**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2019. p. 1–63. 2019.

DOS SANTOS, C. A.; REZENDE, C. de P.; MACHADO PINHEIRO, É. F.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. **Geoderma**, v. 337, n. September 2018, p. 394–401, 2019. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.09.045.

DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1713–1722, 2011. doi: 10.1590/s0100-06832011000500026.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159–168, 2016. doi: 10.1590/S0100-204X2016000200008.

EMBRAPA. Ecofisiologia da Soja. **circular tecnica 48**, p. 1–9, 2007a.

EMBRAPA. Fenotipagem para tolerância à seca visando o melhoramento genético do trigo no Cerrado. **Circular técnica online 21**, v. 21, p. 24, 2007b.

EMBRAPA. **Pastagens**. doi: <https://www.embrapa.br/agrobiologia/pesquisa-e-desenvolvimento/pastagens>. Acesso em: 28 jun. 2020a.

EMBRAPA. **Brasil é referência mundial em plantio direto**. doi: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18023284/brasil-e-referencia-mundial-em-plantio-direto>. Acesso em: 28 jul. 2020b.

EZE, S.; DOUGILL, A. J.; BANWART, S. A.; HERMANS, T. D. G.; LIGOWE, I. S.; THIERFELDER, C. Impacts of conservation agriculture on soil structure and hydraulic properties of Malawian agricultural systems. **Soil and Tillage Research**, v. 201, n. March, p.

104639, 2020. doi: 10.1016/j.still.2020.104639.

FAO. **Basic principles of conservation agriculture**. doi: <http://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>. Acesso em: 15 set. 2020.

FIDALSKI, J.; YAGI, R.; TORMENA, C. A. Revolvimento ocasional e calagem em latossolo muito argiloso em sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1483–1489, 2015. doi: 10.1590/01000683rbc20140428.

FILHO, J. T.; RALISCH, R.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultura para avaliação do estado física de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 393–399, 1999.

FILIPOVIC, D.; KOSUTIC, S.; GOSPODARIC, Z.; ZIMMER, R.; BANAJ, D. The possibilities of fuel savings and the reduction of CO₂ emissions in the soil tillage in Croatia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 115, n. 1–4, p. 290–294, 2006. doi: 10.1016/j.agee.2005.12.013.

FIORINI, A.; BOSELLI, R.; MARIS, S. C.; SANTELLI, S.; ARDENTI, F.; CAPRA, F.; TABAGLIO, V. May conservation tillage enhance soil C and N accumulation without decreasing yield in intensive irrigated croplands? Results from an eight-year maize monoculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 296, n. March, p. 106926, 2020. doi: 10.1016/j.agee.2020.106926.

FLÁVIO NETO, J.; SEVERIANO, E. D. C.; COSTA, K. A. de P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; GONÇALVES, W. G.; ANDRADE, R. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, n. 3, p. 375, 2015. doi: 10.4025/actasciagron.v37i3.19392.

FREY, B.; KREMER, J.; RÜDT, A.; SCIACCA, S.; MATTHIES, D.; LÜSCHER, P. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. **European Journal of Soil Biology**, v. 45, n. 4, p. 312–320, 2009. doi: 10.1016/j.ejsobi.2009.05.006.

FREY, B.; NIKLAUS, P. A.; KREMER, J.; LÜSCHER, P.; ZIMMERMANN, S. Heavy-machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 77, n. 17, p. 6060–6068, 2011. doi: 10.1128/AEM.05206-11.

GALDOS, M. V.; BROWN, E.; ROSOLEM, C. A.; PIRES, L. F.; HALLETT, P. D.; MOONEY, S. J. *Brachiaria* species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 5072, 2020. doi: 10.1038/s41598-020-61986-0.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L. Resistência À Penetração, Eficiência De Escarificadores Mecânicos E... **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, p. 1234–1244, 2014.

GRANDY, A. S.; ROBERTSON, G. P.; THELEN, K. D. Do productivity and environmental trade-offs justify periodically cultivating no-till cropping systems? **Agronomy Journal**, v. 98, n. 6, p. 1377–1383, 2006. doi: 10.2134/agronj2006.0137.

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.

HÅKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. **Soil and Tillage Research**, v. 46, n. 3–4, p. 209–223, 1998. doi: 10.1016/S0167-1987(98)00099-3.

HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, v. 11, n. 3–4, p. 239–282, 1988. doi: 10.1016/0167-1987(88)90003-7.

HAKOJÄRVI, M.; HAUTALA, M.; RISTOLAINEN, A.; ALAKUKKU, L. Yield variation of spring cereals in relation to selected soil physical properties on three clay soil fields. **European Journal of Agronomy**, v. 49, p. 1–11, 2013. doi: 10.1016/j.eja.2013.03.003.

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. doi: 10.1016/j.still.2004.08.009.

HARRISON-KIRK, T.; THOMAS, S. M.; CLOUGH, T. J.; BEARE, M. H.; VAN DER WEERDEN, T. J.; MEENKEN, E. D. Compaction influences N₂O and N₂ emissions from ¹⁵N-labeled synthetic urine in wet soils during successive saturation/drainage cycles. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 88, p. 178–188, 2015. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.05.022.

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. doi: 10.2136/sssaj2002.1320.

HORN, R.; DOMZZAŁ, H.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 35, n. 1–2, p. 23–36, 1995. doi: 10.1016/0167-1987(95)00479-C.

IBGE. **Censo Agropecuário**. doi: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6640>. Acesso em: 25 jun. 2020.

IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. Narrow-band reflectance indices for mapping the combined effects of water and nitrogen stress in field grown tomato crops. **Biosystems Engineering**, v. 192, p. 133–143, 2020. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.01.017.

KAN, Z. R.; LIU, Q. Y.; HE, C.; JING, Z. H.; VIRK, A. L.; QI, J. Y.; ZHAO, X.; ZHANG, H. L. Responses of grain yield and water use efficiency of winter wheat to tillage in the North China Plain. **Field Crops Research**, v. 249, n. November 2019, p. 107760, 2020. doi: 10.1016/j.fcr.2020.107760.

- KARLEN, D. L. Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v. 78, n. 2, p. 129–130, 2004. doi: 10.1016/j.still.2004.02.001.
- KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of Conservation Agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 1, p. 29–51, 2019. doi: 10.1080/00207233.2018.1494927.
- KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; PETH, S.; BERLI, M.; DELENNE, J. Y.; BAUMGARTEN, W.; RABEL, W.; RADJAÏ, F.; RAJCHENBACH, J.; SELVADURAI, A. P. S.; OR, D. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 128, p. 61–80, 2013. doi: 10.1016/j.still.2012.10.004.
- KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. January, p. 104293, 2019. doi: 10.1016/j.still.2019.104293.
- KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 221–227, 2007. doi: 10.1590/s0100-06832007000200004.
- KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MASSING, J. P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciencia Rural**, v. 38, n. 2, p. 365–371, 2008. doi: 10.1590/S0103-84782008000200011.
- KLUTE, A. Water Retention: Laboratory Methods. **American Society of Agronomy**, v. 9, n. 9, p. 635–662, 1986. doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26.
- KOCHHANN, R. A, DENARDIN, J. E. Implantação e Manejo do Sistema Plantio Direto. **Embrapa Trigo**, p. 36, 2000.
- KOOISTRA, M. J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F. R.; VEEN, B. W.; VAN NOORDWIJK, M. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique - II. Effects of soil compaction. **Plant and Soil**, v. 139, n. 1, p. 119–129, 1992. doi: 10.1007/BF00012849.
- KOOISTRA, M. J.; TOVEY, N. K. Effects of compaction on soil microstructure. **Soil compaction in crop production**, p. 91–111, 1994. doi: 10.1016/0148-9062(95)93277-v.
- 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. doi: 10.1016/j.still.2014.03.005.
- LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 7, n. 5, p. 5875–5895, 2015. doi: 10.3390/su7055875.
- LEMES, E. M.; MACHADO, T. V.; GONTIJO, L. N.; DE ANDRADE, S. L.; TORRES, J. L. R.; SANTOS, M. A.; COELHO, L. Detection of rubber tree orchards infested by *Meloidogyne exigua* using vegetation indexes obtained from satellite images. **New Forests**, v. 51, n. 5, p. 765–779, 2020. doi: 10.1007/s11056-019-09760-7.

- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science. Soil Sci.**, v. 1, p. 277–294, 1985. doi: 10.1097/00010694-199005000-00010.
- LOZANO, L. A.; SORACCO, C. G.; VILLARREAL, R.; RESSIA, J. M.; SARLI, G. O.; FILGUEIRA, R. R. Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1–12, 2016. doi: 10.1590/18069657rbcS20150160.
- LU, J.; ZHANG, Q.; WERNER, A. D.; LI, Y.; JIANG, S.; TAN, Z. Root-induced changes of soil hydraulic properties – A review. **Journal of Hydrology**, v. 589, n. June, p. 125203, 2020. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125203.
- MAHL, D.; DA SILVA, R. B.; GAMERO, C. A.; SILVA, P. R. A. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto escarificado. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 30, n. 5 SUPPL, p. 741–747, 2008. doi: 10.4025/actasciagron.v30i5.5976.
- MCPHEE, J. E.; ANTILLE, D. L.; TULLBERG, J. N.; DOYLE, R. B.; BOERSMA, M. Managing soil compaction – A choice of low-mass autonomous vehicles or controlled traffic? **Biosystems Engineering**, v. 195, p. 227–241, 2020. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.05.006.
- MELERO, S.; PANETTIERI, M.; MADEJÓN, E.; MACPHERSON, H. G.; MORENO, F.; MURILLO, J. M. Implementation of chiselling and mouldboard ploughing in soil after 8 years of no-till management in SW, Spain: Effect on soil quality. **Soil and Tillage Research**, v. 112, n. 2, p. 107–113, 2011. doi: 10.1016/j.still.2010.12.001.
- MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture: Soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 1, n. 3, p. 37–48, 2013. doi: 10.1016/S2095-6339(15)30029-0.
- MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; MORO, M.; MAIER, C. Expansion of Brazilian Agricultural Territory : Changes in Land Use Introduction : **INTERNATIONAL CONFERENCE: LAND CONSERVATION - LANDCON 0905.**, p. 2002–2008, 2009.
- MOME FILHO, E. A.; SILVA, A. P. da; 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. doi: 10.1590/s0100-06832014000300006.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIEN, R.; LEITNER, D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, n. March 2019, p. 104611, 2020. doi: 10.1016/j.still.2020.104611.
- MORAES, M. T. de; SILVA, V. R. Da; ZWIRTES, A. L.; CARLESSO, R. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 179–193, 2014.
- MOREIRA, S. G. Informações Agronômicas Nº 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. doi: 10.1007/s13593-011-0071-8.
- 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. doi: 10.1016/j.still.2014.12.007.
- PACHECO, L. P.; MIGUEL, A. S. D. C. S.; BONFIM-SILVA, E. M.; DE SOUZA, E. D.; DA SILVA, F. D. Influência da densidade do solo em atributos da parte aérea e sistema radicular de crotalaria1. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 45, n. 4, p. 464–472, 2015. doi: 10.1590/1983-40632015v4538107.
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2 SPEC.ISS., p. 131–143, 2004. doi: 10.1016/j.still.2004.07.002.
- PAIVA, I. A. de; RITA, Y. L.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. Knowledge and use of visual soil structure assessment methods in Brazil – A survey. **Soil and Tillage Research**, v. 204, n. May, p. 104704, 2020. doi: 10.1016/j.still.2020.104704.
- 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.; GODINHO SILVA, S. H.; KARLEN, D. L.; MOREIRA, S. G.; PEREIRA DA SILVA, A. A.; VILELA DE RESENDE, Á.; NORTON, L. D.; CURI, N. Diagnosing, Ameliorating, and Monitoring Soil Compaction in No-Till Brazilian Soils. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2019b. doi: 10.2134/age2018.09.0035.
- PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; GODINHO SILVA, S. H.; KARLEN, D. L.; MOREIRA, S. G.; PEREIRA DA SILVA, A. A.; VILELA DE RESENDE, Á.; NORTON, L. D.; CURI, N. Diagnosing, Ameliorating, and Monitoring Soil Compaction in No-Till Brazilian Soils. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2019c. doi: 10.2134/age2018.09.0035.
- PEIXOTO, D. S.; SILVA, L. de 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. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140887.
- PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; ROSA, J. A.; COOPER, M.; HECK, R. J.; PASSONI, S.; ROQUE, W. L. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 66–79, 2017. doi: 10.1016/j.still.2016.07.010.
- 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. doi: 10.1111/ejss.12880.

QIN, H. ling; GAO, W. sheng; MA, Y. cun; MA, L.; YIN, C. mei; CHEN, Z.; CHEN, C. Effects of Subsoiling on Soil Moisture Under No-Tillage for Two Years. **Agricultural Sciences in China**, v. 7, n. 1, p. 88–95, 2008. doi: 10.1016/S1671-2927(08)60026-7.

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; BONA, F. D. de. Diagnóstico Rápido da estrutura do solo - DRES. **EMBRAPA - Manual de métodos de análise de solo - Capítulo 19**, p. 185–195, 2017.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v. 42, n. 3–4, p. 259–280, 2005. doi: 10.1016/j.jterra.2004.10.010.

REICHERT, J. M.; DA ROSA, V. T.; VOGELMANN, E. S.; DA ROSA, D. P.; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTLER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123–136, 2016. doi: 10.1016/j.still.2015.11.010.

REICHERT, J. M.; EDUARDO, L.; SANCHES, A.; JOSE, D.; HORN, R.; HA, 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. doi: 10.1016/j.still.2008.07.002.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo Vol 5**, p. 49–134, 2007.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, R. F.; ROS, C. O. 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. doi: 10.5039/agraria.v8i3a2489.

SANTI, A. L.; DAMIAN, J. M.; CHERUBIN, M. R.; AMADO, T. J. C.; EITELWEIN, M. T.; VIAN, A. L.; HERRERA, W. F. B. Soil physical and hydraulic changes in different yielding zones under no-tillage in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 15, p. 1326–1335, 2016. doi: 10.5897/AJAR2015-10643.

SANTI, A. L.; JORGE, T.; AMADO, C.; RODRIGUES, V. INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO, DETERMINADA POR DIFERENTES MÉTODOS, COMO INDICADOR DO POTENCIAL PRODUTIVO EM DOIS LATOSSOLOS MANEJADOS COM AGRICULTURA DE PRECISÃO. **Interciencia**, v. 37, n. 3, p. 204–208, 2012.

SCHERER, E. E.; BALDISSERA, I. T.; NESI, C. N. Propriedades químicas de um latossolo vermelho sob plantio direto e adubação com esterco de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 123–131, 2007.

SCHLEGEL, A.; HOLMAN, J. D.; ASSEFA, Y. A single tillage in a long-term no-till system on dryland crop performance. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 4, p. 3174–3187, 2020. doi: 10.1002/agj2.20284.

SCHLÜTER, S.; GROSSMANN, C.; DIEL, J.; WU, G. M.; 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. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.07.001.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciencia Rural**, v. 39, n. 1, p. 58–64, 2009. doi: 10.1590/S0103-84782009000100010.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O. da. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, p. 797–804, 2004. doi: 10.1590/s0100-06832004000500001.

SEKI, A. S.; SEKI, F. G.; JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A.; BENEZ, S. H. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 46, n. 3, p. 460–468, 2015. doi: 10.5935/1806-6690.20150027.

SERAFIM, M. E.; VITORINO, A. C. T. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletromecânico de bancada | Desarrollo de un penetrógrafo electromecánico de banco Development of an electro mechanic counter penetograph. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 17, n. 1, p. 61–65, 2008.

SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, G. C. De; DIAS JUNIOR, M. D. S.; COSTA, K. A. de P.; SILVA, F. G.; FERREIRA FILHO, S. M. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I – Relationships between soil physical properties and least limiting. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 773–782, 2011.

SILVA, A. S.; DA SILVA, I. F.; BANDEIRA, L. B.; DIAS, B. O.; DA SILVA NETO, L. F. Clay and organic matter and effects on aggregation in different soil uses | Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciencia Rural**, v. 44, n. 10, p. 1783–1789, 2014. doi: 10.1590/0103-8478cr20130789.

SILVA, S. R. da; BARROS, N. F. de; COSTA, L. M. da; 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.

SINGH, A.; PHOGAT, V. K.; DAHIYA, R.; BATRA, S. D. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice-wheat cropping system. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 98–105, 2014. doi: 10.1016/j.still.2014.03.002.

SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. (Editors). **Soil Compaction in Crop Production** (Elsevier Science, Ed.)Amsterdam, 1994. .

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1–2, p. 179–201, 1990. doi: 10.1016/0167-1987(90)90029-D.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Soil Science Society of America: Glossary of soil science terms**. [s.l: s.n.]v. 42

STOLF, R.; THURLER, Á. D. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Method to estimate

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.

THIERFELDER, C.; WALL, P. C. Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe. **Soil and Tillage Research**, v. 105, n. 2, p. 217–227, 2009. doi: 10.1016/j.still.2009.07.007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. CARACTERIZAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO ROXO SOB PLANTIO DIRETO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573–581, 1998.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 3, p. 421–428, 2008. doi: 10.1590/S0100-204X2008000300018.

TULLBERG, J. N.; YULE, D. F.; MCGARRY, D. Controlled traffic farming-From research to adoption in Australia. **Soil and Tillage Research**, v. 97, n. 2, p. 272–281, 2007. doi: 10.1016/j.still.2007.09.007.

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. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.07.016.

VERHULST, N.; NELISSEN, V.; JESPER, N.; HAVEN, H.; SAYRE, K. D.; RAES, D.; DECKERS, J.; GOVAERTS, B. Soil water content, maize yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semi-arid highlands. **Plant and Soil**, v. 344, n. 1, p. 73–85, 2011. doi: 10.1007/s11104-011-0728-8.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 213–223, 2011. doi: 10.1590/S0100-06832011000100020.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1271–1280, 2007. doi: 10.1590/s0100-06832007000600006.

WANG, M.; HE, D.; SHEN, F.; HUANG, J.; ZHANG, R.; LIU, W.; ZHU, M.; ZHOU, L.; WANG, L.; ZHOU, Q. Effects of soil compaction on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soybean seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 22, p. 22835–22845, 2019. doi: 10.1007/s11356-019-05606-z.

WANG, Q.; LU, C.; LI, H.; HE, J.; SARKER, K. K.; RASAILY, R. G.; LIANG, Z.; QIAO, X.; LI, H.; MCHUGH, A. D. J. The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-Year experiment on alkaline soils of Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v. 137, p. 43–49, 2014. doi: 10.1016/j.still.2013.11.006.

WHALLEY, W. R.; LEEDS-HARRISON, P. B.; CLARK, L. J.; GOWING, D. J. G. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v. 84, n. 1, p. 18–27, 2005. doi: 10.1016/j.still.2004.08.003.

WHITMORE, A. P.; WHALLEY, W. R. Physical effects of soil drying on roots and crop

growth. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2845–2857, 2009. doi: 10.1093/jxb/erp200.

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. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122700.

YADAV, G. S.; LAL, R.; MEENA, R. S. Vehicular traffic effects on hydraulic properties of a Crosby silt loam under a long-term no-till farming in Central Ohio, USA. **Soil and Tillage Research**, v. 202, n. May, p. 104654, 2020. doi: 10.1016/j.still.2020.104654.

ZHANG, D.; DAI, Y.; WANG, L.; CHEN, L. Influence of living and dead roots of gansu poplar on water infiltration and distribution in soil. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 10, 2020. doi: 10.3390/app10103593.

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.

ZHANG, Y.; WANG, R.; WANG, S.; WANG, H.; XU, Z.; JIA, G.; WANG, X.; LI, J. Effects of different sub-soiling frequencies incorporated into no-tillage systems on soil properties and crop yield in dryland wheat-maize rotation system. **Field Crops Research**, v. 209, n. April, p. 151–158, 2017. doi: 10.1016/j.fcr.2017.05.002.

ZHOU, M.; MA, X.; WANG, K.; CHENG, T.; TIAN, Y.; WANG, J.; ZHU, Y.; HU, Y.; NIU, Q.; GUI, L.; YUE, C.; YAO, X. Detection of phenology using an improved shape model on time-series vegetation index in wheat. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, n. April, p. 105398, 2020. doi: 10.1016/j.compag.2020.105398.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

EFEITO DO PREPARO OCASIONAL NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SEUS REFLEXOS NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS SOB PLANTIO DIRETO

Lázaro Longue Mosa¹

RESUMO

A compactação do solo é um entrave à produtividade de grãos constantemente observada em áreas sob sistema plantio direto (SPD). Neste contexto, o preparo ocasional (PO) é uma opção apresentada para mitigar a compactação do solo em áreas sob plantio direto. O PO consiste na intervenção mecânica estratégica através do uso de implementos capazes de romper a camada compactada. Entretanto, é preciso cautela para adoção do PO, visto que o revolvimento do solo fere um dos princípios do SPD. O efeito do PO sobre a produtividade de grãos é controverso na literatura, uma vez que pode ou não ser observado. Não há na literatura trabalhos que monitoraram em longo prazo os efeitos do PO nas propriedades do solo e seus reflexos na produtividade dos cultivos. Os objetivos deste estudo foram (a) avaliar o efeito do PO e PO associado à calagem nas propriedades do solo e seus reflexos na produtividade de soja, milho, feijão e trigo, em longo prazo; e (b) avaliar os efeitos da frequência pré-estabelecida de subsolagem (a cada dois e a cada três anos) nas propriedades físicas do solo e na produtividade de grãos. Para isso um estudo foi conduzido em um experimento implantado em faixas no ano de 2015 na Fazenda Santa Helena, no município de Nazareno – MG, onde foram testados três implementos em diferentes frequências de PO na mitigação da compactação bem como seus reflexos na produtividade. Desta forma os tratamentos foram: NT – sistema plantio direto contínuo; NTS2 - SPD subsolado predominantemente a cada 2 anos (2015/2017/2020; NTS3-SPD subsolado a cada 3 anos (2015/2018); NTSSL - SPD subsolado em 2015 + aplicação de calcário em superfície; NTSDL - SPD subsolado em 2015 + aplicação de calcário em profundidade; NTC – SPD escarificado até a profundidade de 26 cm em 2015. O preparo ocasional em solo sob SPD consolidado promoveu melhoria da qualidade física do solo com aumento de produtividade de grãos de duração direta de 18 meses, e algum efeito residual benéfico na produtividade no total dos 5 anos de experimento, sendo que todos os tratamentos mecanizados uma única vez apresentaram média produtiva superior ao tratamento controle, contudo a adoção de frequência de preparo pré-estabelecida se mostrou prejudicial a produtividade das culturas, uma vez que apresentou o pior desempenho produtivo no acumulado dos 9 cultivos. No momento de maior restrição hídrica do experimento foi possível evidenciar de forma mais clara as diferenças entre tratamentos. Os equipamentos utilizados na subsolagem diferiram somente na persistência dos efeitos de alívio estrutural, porém no acumulado de produção ao final do experimento, não houve diferença entre os implementos.

Palavras-chave: Compactação do solo. Subsolador. Escarificador. Manejo do solo.

**ARTICLE: EFFECT OF OCCASIONAL TILLAGE ON THE PHYSICAL
ATTRIBUTES OF THE SOIL AND THEIR REFLECTIONS ON THE
PRODUCTIVITY OF GRAIN UNDER NO-TILLAGE**

ABSTRACT

Soil compaction is an obstacle to grain yield constantly observed in areas under no-tillage system (NT). In this context, occasional tillage (OT) is an option presented to mitigate soil compaction in areas under no-tillage. The OT consists of strategic mechanical intervention through the use of implements capable of breaking through the compacted layer. However, it is necessary to be cautious when adopting the OT, since the soil disturbance violates one of the principles of the NT. The effect of OT on grain yield is controversial in the literature, as it may or may not be observed. There are no studies in the literature that monitored the long-term effects of OT on soil properties and its effects on crop productivity. The objectives of this study were (a) to evaluate the effect of OT and OT associated with liming on soil properties and its effects on soybean, corn, bean and wheat yields in the long term; and (b) to evaluate the effects of the pre-established frequency of subsoiling (every two and every three years) on soil physical properties and grain yield. For this, a study was conducted in an experiment implemented in strips in the year 2015 at Fazenda Santa Helena, in the municipality of Nazareno - MG, where three implements were tested at different frequencies of OT in the mitigation of compaction as well as its reflexes on productivity. Thus, the treatments were: NT – continuous no-tillage system; NTS2 - NT subsoiled predominantly every 2 years (2015/2017/2020); NTS3- NT subsoiled every 3 years (2015/2018); NTSSL - NT subsoiled in 2015 + application of limestone on the surface; NTSDL - NT subsoiled in 2015 + application of limestone in depth; NTC – NT scarified to a depth of 26 cm in 2015. Occasional tillage in soil under consolidated NT promoted an improvement in the physical quality of the soil with an increase in grain yield of direct duration of 18 months, and some effect beneficial residual in productivity in the total of the 5 years of experiment, and all mechanized treatments once presented a higher average productivity than the control treatment, however the adoption of pre-established preparation frequency proved to be harmful to crop productivity, since presented the worst productive performance in the accumulated of the 9 cultures. At the moment of greater water restriction of the experiment, it was possible to show more clearly the differences between treatments. The equipment used in subsoiling differed only in the persistence of structural relief effects, but in the accumulated production at the end of the experiment, there was no difference between the implements.

Keywords: Soil compaction. Subsoiling. Chisel plowing. Soil management.

1.Introdução

O sistema plantio direto (SPD) é amplamente difundido na agricultura e praticado nas mais distintas regiões do planeta (Derpsch et al., 2010), sendo que o Brasil ocupa o segundo lugar em área com cerca de 33 milhões de hectares (Kassam et al., 2018; FEBRAPDP, 2021). Apesar dos inúmeros benefícios do SPD (Lal et al., 2007; Derpsch et al., 2010; Blanco-Canqui e Ruis, 2018) a compactação do solo tem sido cada vez mais reportada, ameaçando o potencial produtivo das culturas (Jamali et al., 2021), gerando impactos ambientais (Soane e van Ouwerkerk, 1995a) e econômicos à agricultura (Graves et al., 2015). A intensificação do uso do solo e, conseqüentemente, das operações mecanizadas, associado ao aumento do peso das máquinas agrícolas (Keller et al., 2019) e o baixo aporte de matéria orgânica, devido à baixa diversidade de cultivos, são os principais fatores que explicam o aumento da compactação do solo em áreas sob SPD.

Para mitigar os efeitos da compactação do solo em SPD, o uso do preparo ocasional (PO) vem sendo encorajado, o qual consiste na intervenção mecânica estratégica por meio do uso de arados, grades, escarificadores ou subsoladores, a fim de romper a camada compactada (Blanco-Canqui e Wortmann, 2020; Dang et al., 2015; Lozano et al., 2016; Peixoto et al., 2020, 2019a, 2019b). Em uma metanálise que avaliou os efeitos do PO nas propriedades do solo e produtividade das culturas, Peixoto et al. (2020) concluíram que o PO melhora as propriedades físicas do solo por promover redução da densidade do solo, da resistência à penetração e aumento da porosidade total, apesar da redução na estabilidade dos agregados; reduz também o carbono orgânico total quando o arado/grade é utilizado como equipamento de preparo; reduz a erosão pelo incremento da infiltração de água e redução do escoamento superficial, mesmo reduzindo a percentagem de cobertura morta do solo; e não tem efeito na produtividade dos cultivos, exceto em regiões com restrição hídrica e solos com baixa capacidade de retenção e disponibilidade de água.

A intensidade e profundidade de mobilização do solo podem ser diferentes a depender dos tipos de equipamentos utilizados, sendo que subsoladores e escarificadores tem apresentado vantagens em relação ao uso de arado/grade, por não revolver o solo, preservando a estrutura e o estoque de carbono, além de apresentarem maior profundidade efetiva de trabalho (Peixoto et al., 2020). O PO utilizando subsoladores tem se mostrado eficiente para mitigar a compactação do solo (Peixoto et al., 2020; Schneider et al., 2017). Além disso, quando

associado ao aporte de palhada aumenta a atividade microbiana no subsolo, promovendo aumento de produtividade das culturas (Liu et al., 2022).

O principal aspecto que justifica o PO promover benefícios às propriedades físicas do solo sem afetar a produtividade dos cultivos é o diagnóstico incorreto do estado de compactação do solo (Peixoto et al., 2020). Os autores justificaram que a resistência do solo à penetração e a macroporosidade, na maioria dos estudos, não foram considerados limitantes, estando abaixo de 2.0 MPa e maior que $0.100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. O correto diagnóstico da compactação é fundamental para que se determine a necessidade do PO, a profundidade de trabalho e o melhor equipamento a ser utilizado.

Entre os atributos físicos do solo que interferem no rendimento das culturas estão a disponibilidade de água e capacidade de retenção do solo, oxigênio, temperatura e resistência mecânica (LETEY, 1985). Estudos mostraram que muitas vezes não há correlação entre as propriedades físicas do solo e o rendimento das culturas, quando o fornecimento de água para as plantas atende à demanda hídrica das espécies cultivadas (SECCO et al., 2004; KLEIN; CAMARA, 2007; CALONEGO; ROSOLEM, 2010; HAKOJÄRVI et al., 2013; GIRARDELLO; AMADO; SANTI, 2014; CECAGNO et al., 2016; CALONEGO et al., 2017). Ademais, os efeitos sazonais e diferenças entre as culturas também podem gerar respostas diferentes de produtividade em função do manejo de solo (SECCO et al., 2009; CONYERS et al., 2019).

Não há na literatura trabalhos que monitoraram em longo prazo os efeitos do PO nas propriedades do solo e seus reflexos na produtividade dos cultivos. Portanto, as hipóteses deste estudo são: a) PO promove redução da RP e da DS e aumento da PT e macroporosidade, com efeito residual de curto prazo; b) de maneira geral, a PO não promove incremento na produtividade de grãos, exceto quando há restrição hídrica; c) a frequência pré-estabelecida de subsolagem ou escarificação promove pequeno efeito benéfico nas propriedades físicas do solo, com efeito nulo ou negativo na produtividade de grãos; d) o tipo de equipamento para a PO tem efeitos distintos no alívio estrutural do solo podendo afetar de formas distintas a produtividade de grãos. Os objetivos deste estudo foram: (1) avaliar o efeito do PO e PO associado a calagem nas propriedades do solo e seus reflexos na produtividade de soja, milho, feijão e trigo, em longo prazo; e (2) avaliar os efeitos da frequência pré-estabelecida de subsolagem (a cada dois e a cada três anos) nas propriedades físicas do solo e na produtividade de grãos.

2. Materiais e métodos

2.1. Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido em um experimento implantado em faixas no ano de 2015 na Fazenda Santa Helena, localizada a 21° 15' 39" S e 44° 31' 04" W no município de Nazareno – MG. O clima é do tipo Cwa (classificação de Köppen), com invernos secos e verões quentes e úmidos. A precipitação mensal ao longo do experimento está apresentada na Figura 1. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico de textura argilosa de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (Santos et al., 2018), e a Typic Hapludox de acordo com o US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). A média de distribuição de argila, silte e areia no perfil do solo da área experimental é de 530, 250 e 220 g kg⁻¹, respectivamente.

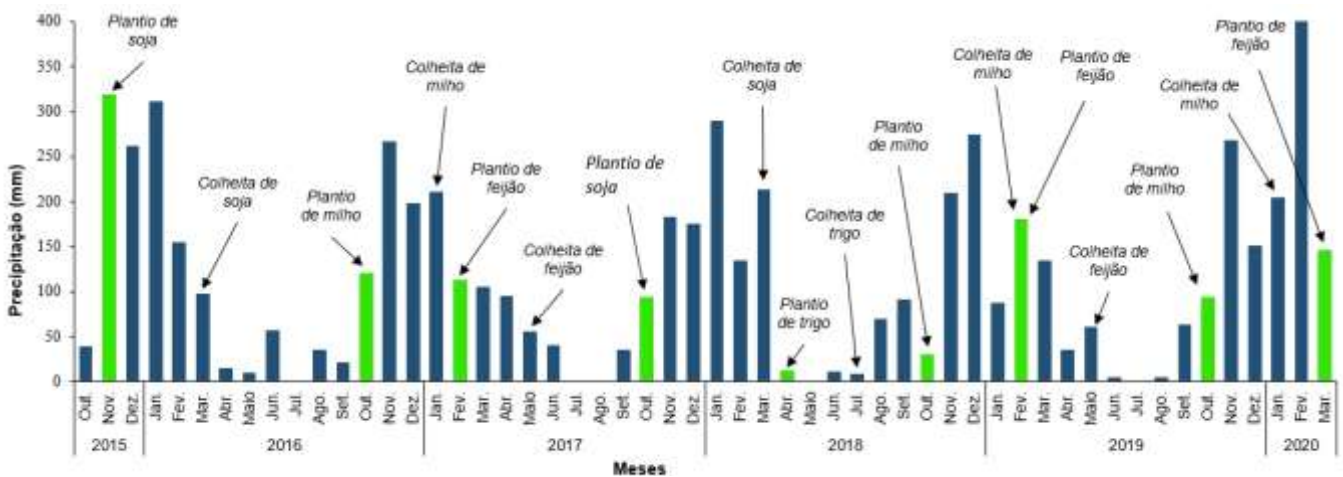


Figura 1. Precipitação mensal na fazenda Santa Helena no período de outubro de 2015 a março de 2020. Os meses destacados em verde correspondem aos plantios dos cultivos avaliados durante o experimento.

O experimento foi implantado em área comercial da fazenda, sendo assim, as culturas praticadas, correções e adubações, manejo de pragas, doenças e plantas daninhas foram definidas pela fazenda. Na Tabela 1 estão apresentadas as adubações realizadas em cada cultura ao longo do experimento, as quais são baseadas na exportação de nutrientes pela cultura de acordo com as produtividades esperadas. O sistema de manejo consistiu na rotação de culturas milho-soja-feijão-trigo (Tabela 1) com o objetivo de produção de grãos. Previamente à soja da safra 2015/16, o solo foi cultivado com milho (safra outono-inverno/2015).

Tabela 1. Cultivares, datas de plantio e adubações realizadas nos cultivos avaliados durante a condução do experimento.

Cultivo	Cultura	Cultivar	Data de plantio	Adubação de plantio		1ª adubação de cobertura		2ª adubação de cobertura		3ª adubação de cobertura	
				Formulado	kg ha ⁻¹	Formulado	kg ha ⁻¹	Formulado	kg ha ⁻¹	Formulado	kg ha ⁻¹
2015/16	Soja	VTOP / NS 7000	11/11/2015	11-52-00	100	00-00-60	150				
2016/17	Milho	DKB 230 PRO3	06/10/2016	11-52-00	150	00-00-60	250	34-00-00	430	46-00-00	250
2017	Feijão comum	Feijão Preto Tuiuiú	07/02/2017	13-33-00	210	45-00-00	250				
2017/18	Soja	Monsoy 5917 IPRO	30/10/2017	08-40-00	230	00-00-60	250				
2018	Trigo	SINTONIA / BRS 264	03/04/2016								
2018/19	Milho	DKB 230 PRO3	05/10/2018	9-43-00	150	00-00-60	250	33-00-00	330	45-00-00	230
2019	Feijão comum	Esteio	23/02/2019	11-52-00	0,100			33-00-00	300		
2019/20	Milho	DKB 230 PRO3	03/10/2019	09-43-00 MS9	200	00-00-60	180	33-00-00	330	45-00-00	230
2020	Feijão comum	Feijão Preto Tuiuiú	07/03/2020	13-33-00 + S	200			45-00-00	170		

Os formulados descritos são compostos por N, P, K, nesta ordem. As adubações e correções, bem como escolha dos cultivares e datas de plantio foram realizados segundo critério da fazenda Santa Helena.

2.2 *Tratamentos*

A área foi escolhida para implantação do experimento pelo tempo de condução do SPD (desde 2005), que apresentava sinais de problemas de compactação, como observado por Peixoto et al. (2019a) em trabalho conduzido na mesma área, através de análise morfológica do perfil do solo realizada em 2015. O experimento foi esquematizado em grandes faixas para viabilizar os tratamentos com preparo do solo com diferentes equipamentos e avaliações sucessivas da produtividade e amostragem de solo. As faixas foram definidas com 18 m de largura e 80 m de comprimento (1440 m²) e divididas em 4 parcelas experimentais de 18 x 20 m de 360 m² (Figura 2). Os tratamentos consistiram de intervenções de preparo ocasional em SPD e foram descritos como: NT – SPD contínuo (10 anos no momento da implantação do experimento em 2015); NTS2 - SPD subsolado a uma profundidade de ~0,60 m com subsolador Ikeda[®] predominantemente a cada 2 anos (2015/2017/2020 - devido a impossibilidade da fazenda em realizar a subsolagem em 2019, a terceira subsolagem foi realizada em 2020); NTS3- SPD subsolado a uma profundidade de ~0,60 m com subsolador Ikeda[®] a cada 3 anos (2015/2018); NTSSL - SPD subsolado a uma profundidade de ~0,60 m com subsolador Ikeda[®] em 2015 + aplicação de 1,44 t ha⁻¹ de calcário (PRNT = 180%) em superfície (além das aplicações realizadas pela fazenda em area total); NTSDL - SPD subsolado a uma profundidade de ~0,60 m com subsolador KAMAQ[®] em 2015 + aplicação de 1,44 t ha⁻¹ de calcário (PRNT = 180%) em profundidade (além das aplicações realizadas pela fazenda em area total); NTC – SPD escarificado com escarificador Stara Fox[®] até a profundidade de 26 cm em 2015.

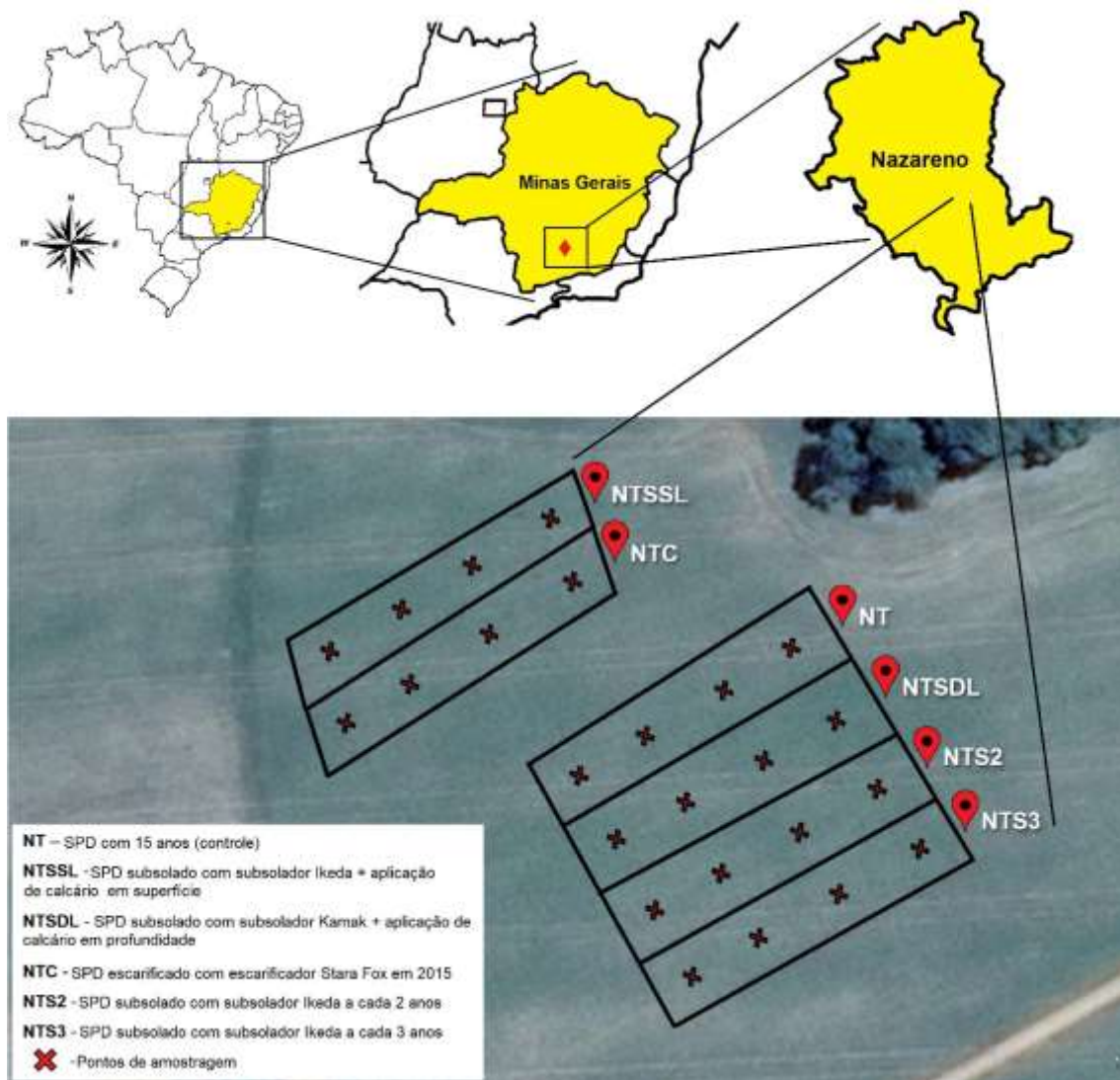


Figura 2. Área experimental localizada na fazenda Santa Helena com os pontos que limitam as faixas que contém os tratamentos.

Para caracterização química do solo foram coletadas 5 amostras simples com trado holandês em 2 profundidades (0-0,20; 0,20-0,40 m) em cada parcela experimental para compor uma amostra composta por profundidade. Assim, para cada tratamento foram coletadas 4 amostras compostas, correspondendo a 4 repetições para avaliação de fertilidade do solo ao final do cultivo de verão 2015/16 e 2019/20.

2.3 Amostragens e Avaliações

As amostragens de cilindros volumétricos (0,06 x 0,025 m) foram realizadas nos anos de 2016 e 2019 em cada parcela experimental em 2 profundidades (0-0,05 m; 0,25-0,30 m), totalizando 48 amostras. Em laboratório, as amostras foram preparadas para que o volume de solo fosse equivalente ao volume do cilindro e em seguida foram saturadas

lentamente por capilaridade, pesadas e submetidas aos potenciais matriciais de -6 e -10 kPa em mesa tensão automatizada (Ecotek[®], Alemanha), e aos potenciais matriciais de -100, -500 e -1500 kPa em extratores de Richards (Soil Moisture, USA), sendo sempre pesadas entre os diferentes potenciais (Klute, 1986). Na sequência foram novamente saturadas e submetidas à -100 kPa, pesadas e submetidas ao teste de penetrometria com velocidade de 100 mm min⁻¹ com penetrômetro de bancada (Marconi, MA 933, Brasil) conforme procedimentos descritos por Peixoto et al. (2019b) para determinação da resistência do solo à penetração (RP). Por fim, foram secas em estufa (105-110 °C) por 24 h e pesadas para cálculo do conteúdo de água volumétrico (θ) em cada potencial e da densidade do solo (Ds). Devido a impossibilidade de realizar os testes de penetrometria em laboratório no ano de 2016, a PR foi obtida no campo com penetrômetro dinâmico de impacto (KAMAQ[®], Brasil) modelo STOLF (Stolf, 1991) de ponta cônica com ângulo de 30° e diâmetro basal de 1,28 cm, sendo que a umidade do solo estava próxima ao sugerido por (Peixoto et al., 2019a) para diagnóstico de compactação do solo. Foram determinados a porosidade total (PT) como equivalente ao conteúdo de água na saturação (θ_s), microporosidade (Mic) pelo θ à -6 kPa e a macroporosidade (Mac) por diferença entre PT e Mic. A capacidade de aeração (CA) foi calculada pela diferença entre o θ_s e a capacidade de campo estimada pelo θ à -10 kPa, conforme Reynolds et al. (2008).

A colheita das culturas para estimativa de produtividade foi realizada ao final dos cultivos de verão e outono-inverno em 4 repetições para todos os tratamentos. Foram utilizadas como parcela útil 3 linhas de 5 metros para as culturas de soja, milho e feijão e 5 linhas de 5 metros para o trigo. A produtividade foi corrigida para umidade de grãos de 13%. Por razões técnicas da fazenda Santa Helena, no cultivo de milho de 2016/17 e no cultivo de feijão comum de 2017 não foram feitas as colheitas dos tratamentos que utilizaram de frequência pré-estabelecida de PO (NTS2; NTS3).

2.4 Análise estatística

Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado para análise de variância, uma vez que a área possui homogeneidade de solo, gradiente de declividade semelhante e histórico de cultivo e manejo iguais para todos os tratamentos. Tal abordagem estatística, usando pontos de amostragens georreferenciados escolhidos aleatoriamente em grandes faixas como replicatas (Ferreira et al., 2012), obteve sucesso em estudos anteriores de Cecagno et al. (2016; 2005), bem como de Peixoto et al. (2019a, 2019b), estes últimos conduzidos na mesma área

experimental do presente trabalho. Os atributos físicos e químicos do solo foram correlacionados linearmente com os dados de produtividade nos cultivos de soja 2015/16 e milho 2019/20, que correspondem aos momentos da primeira e da última avaliação dos atributos químicos e físicos do solo, considerando significância de 0,05. A análise de correlação não fez distinção entre tratamentos.

Os dados dos atributos físicos (Ds, RP, Pt, Mac, CA) e químicos (pH, Ca, Mg, V%) nos cultivos de soja 2015/16 e milho 2019/20, bem como os dados de produtividade para todos os cultivos de grãos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. A comparação das médias foi feita entre tratamentos dentro do mesmo ano de avaliação. Na comparação entre as médias de produtividade no cultivo de milho 2016/17 e feijão 2017, foram desconsiderados os tratamentos NTS2 e NTS3 devido a impossibilidade de colheita nesses dois tratamentos nesses cultivos. Porém, para a análise do acumulado total (2015-2020), foi considerado a produtividade do tratamento NTSSL em substituição aos tratamentos NTS2 e NTS3 devido a condição similar dos mesmos, uma vez que até o ano de 2017 os três tratamentos haviam recebido uma única subsolagem em 2015 com o mesmo equipamento.

Considerando as cotações brasileiras de grãos para o mês de setembro de 2021, foi feita uma estimativa simplificada das diferenças entre a receita líquida do tratamento controle e os tratamentos de PO no acumulado dos 10 cultivos avaliados, considerando os custos das operações de escarificação (US\$ 30,00/ha) e subsolagem (US\$ 37,00/ha) informados pela fazenda Santa Helena, e o lucro com a produção de grãos. Os custos das adubações, bem como as pulverizações de defensivos agrícolas foram desconsiderados, uma vez que foram iguais para todos os tratamentos ao longo do experimento.

3.Resultados

3.1 Propriedades físicas e químicas do solo

Na Tabela 2 estão dispostas as médias das propriedades físicas e químicas do solo, nos cultivos de soja 2015/16 (após primeiro PO) e de milho 2019/20, para todos os tratamentos avaliados. De maneira geral, foi possível observar diferenças entre as médias dos atributos físicos no início do experimento (cultivo de soja 2015/16) e nenhuma diferença no final do (cultivo de milho 2019/20). Comportamento contrário ao observado nas propriedades químicas, onde, apesar de haver alguma diferença no momento inicial do experimento, somente no final

que tais diferenças foram evidenciadas, sobretudo para os tratamentos que receberam doses de calcário.

Tabela 2. Propriedades físicas e químicas do solo nas faixas dos tratamentos nos cultivos de 2015/16 e 2019/20.

Trat.	DS Mg m ⁻³	RP MPa	Mac	CA	PT ---- m ³ m ⁻³ ---	pH	Ca	Mg cmol _c dm ⁻³	V %
cultivo 2015/16									
	Soil layer 0-0.05 m					Soil layer 0-0.20 m			
NT	1,08a	1,09a	0,186b	0,185b	0,561a	4,96a	1,61b	0,50a	39b
NTC	0,94a	0,98a	0,221b	0,272a	0,593a	5,21a	2,11b	0,52a	49b
NTS2	0,98a	0,64b	0,157b	0,182b	0,581a	5,06a	2,07b	0,55a	44b
NTS3	1,05a	0,69b	0,183b	0,206b	0,587a	4,79a	1,79b	0,41b	38b
NTSSL	0,95a	0,64b	0,204b	0,280a	0,602a	4,95a	1,95b	0,64a	43b
NTSDL	0,98a	0,68b	0,285a	0,305a	0,623a	5,50a	3,03a	0,56a	63a
	Soil layer 0,25-0,30 m					Soil layer 0,20-0,40 m			
NT	1,09a	2,76a	0,184a	0,216a	0,586a	5,30a	1,00a	0,30a	23a
NTC	1,11a	2,68a	0,173a	0,198a	0,564a	5,55a	1,22a	0,30a	38a
NTS2	1,11a	1,12b	0,159a	0,188a	0,556a	5,20a	1,30a	0,35a	33a
NTS3	1,07a	1,40b	0,191a	0,217a	0,570a	5,20a	1,10a	0,22a	28a
NTSSL	1,06a	1,22b	0,185a	0,215a	0,571a	5,75a	1,50a	0,45a	39a
NTSDL	1,07a	1,50b	0,208a	0,235a	0,586a	5,37a	1,50a	0,40a	42a
Cultivo 2019/20									
	Soil layer 0-0,05 m					Soil layer 0-0,20 m			
NT	1,03a	1,37a	0,141a	0,166a	0,611a	5,15b	1,37b	0,27b	38b
NTC	1,05a	1,46a	0,147a	0,174a	0,603a	5,24b	1,18b	0,20b	27c
NTS2	1,01a	1,32a	0,164a	0,193a	0,619a	4,85b	1,05b	0,15b	26c
NTS3	0,99a	1,41a	0,164a	0,196a	0,626a	5,15b	1,37b	0,27b	38b
NTSSL	0,95a	0,85a	0,192a	0,226a	0,642a	5,62a	1,91a	0,52a	43b
NTSDL	1,08a	1,89a	0,118a	0,143a	0,590a	5,60a	2,15a	0,45a	54a
	Soil layer 0,25-0,30 m					Soil layer 0,20-0,40 m			
NT	1,02a	1,13a	0,187a	0,212a	0,615a	5,40a	0,90a	0,20b	36a
NTC	1,00a	0,95a	0,179a	0,208a	0,622a	5,30a	0,90a	0,16b	26a
NTS2	1,04a	1,16a	0,176a	0,205a	0,606a	4,87a	1,20a	0,15b	32a

NTS3	1,03a	1,00a	0,174a	0,199a	0,612a	5,20a	0,85a	0,17b	26a
NTSSL	1,02a	0,96a	0,180a	0,209a	0,613a	5,50a	1,28a	0,35a	36a
NTSDL	1,04a	1,08a	0,194a	0,222a	0,607a	5,65a	1,35a	0,30a	45a

Os dados das propriedades físicas (BD, PR, TP, Mac e AC) e químicas (pH, Ca, Mg e V%) nos cultivos de 2015/16 e 2019/20, foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. A comparação das médias foi feita entre tratamentos dentro do mesmo ano de avaliação. Devido a impossibilidade de realizar os testes de penetrometria em laboratório no ano de 2016, a PR foi obtida no campo com penetrômetro dinâmico de impacto (KAMAQ[®], Brasil) modelo Stolf, (1991) de ponta cônica com ângulo de 30° e diâmetro basal de 1,28 cm. NT – sistema plantio direto contínuo; NTS2 - NT subsolado com subsolador Ikeda[®] a cada 2 anos; NTS3- NT subsolado com subsolador Ikeda[®] a cada 3 anos (2015/2018); NTSSL - NT subsolado com subsolador Ikeda[®] em 2015 + aplicação de calcário em superfície; NTSDL - NT subsolado com subsolador KAMAQ[®] em 2015 + aplicação de calcário em profundidade; NTC – NT escarificado com escarificador Stara Fox[®] em 2015.

No primeiro ano de avaliação, dentre as propriedades físicas do solo, a RP, Mac e CA apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos, sendo que os tratamentos NT e NTC tiveram as maiores médias de RP nas duas profundidades avaliadas, enquanto o tratamento NTSDL apresentou média de Mac superior aos demais tratamentos, apenas na profundidade de 0-0,5 m. As médias de CA foram superiores nos tratamentos NTSDL, NTSSL e NTC em relação ao tratamento controle e aos tratamentos que usaram de frequência de subsolagem (NTS2 e NTS3), embora neste momento não houvesse diferença em frequência para os tratamentos subsolados com o implemento Ikeda[®].

No primeiro ano de avaliação, na avaliação das propriedades químicas, o tratamento NTSDL diferiu dos demais, apresentando as maiores médias em Ca e V%, enquanto o tratamento NTS3 apresentou a menor média de Mg dentre os tratamentos na profundidade de 0-0,20 m. Na profundidade de 0,20-0,40 m não houve diferenças entre os tratamentos. No segundo ano de avaliação, os tratamentos que receberam doses de calcário (NTSSL e NTSDL) diferiram dos demais tratamentos apresentando médias superiores em pH, Ca e Mg na profundidade de 0-0,20 m, enquanto para V% a maior média foi observada no tratamento NTSDL, seguido pelos tratamentos NTSSL, NTS3 e NT. Na profundidade de 0,20-0,40 m os tratamentos NTSSL e NTSDL apresentaram médias superiores em Mg em comparação aos demais tratamentos.

Na Figura 3 estão apresentadas as correlações entre as propriedades físicas e químicas do solo e o rendimento de grãos no cultivo de soja 2015/16 e de milho 2019/20, nas duas profundidades avaliadas (0-0,05; 0,25-0,30 m). Na comparação entre os cultivos, foi possível observar que a correlação entre os atributos físicos do solo e a produtividade era maior no início

do experimento, e não foi significativa na última avaliação, comportamento inverso ao ocorrido para a correlação entre a produtividade e os atributos químicos. De maneira geral, o preparo do solo em 2015 proporcionou alívio estrutural que teve efeito sobre a produtividade de grãos no ano de 2016, porém esse efeito não foi observado após 4 anos na cultura do milho 2019/20.

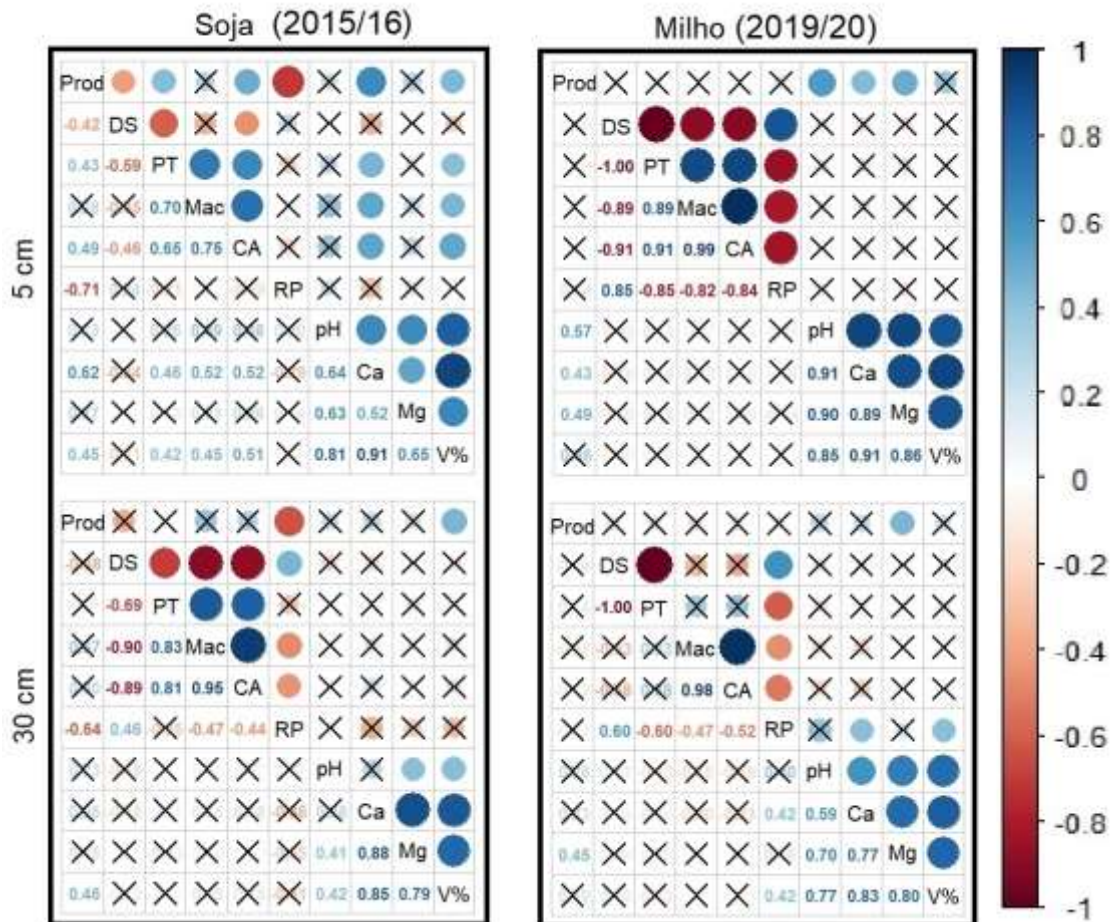


Figura 3. Correlação entre as propriedades físicas e químicas do solo e a produtividade de grãos no cultivo da soja 2015/16 e no cultivo do milho 2019/20 nas profundidades de 0-0,05 e 0,25-0,30 m. Os valores do coeficiente correlação (r) estão mostrados nos quadros na diagonal inferior do gráfico; quadros marcados com X denotam correlação não significativa ($p < 0,05$); DS= densidade do solo; PT= porosidade total; Mac= Macroporosidade; CA= capacidade de aeração; RP= Resistencia à penetração; pH= potencial hidrogeniônico; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio; V%= Saturação por bases.

Para o cultivo de soja 2015/16, na profundidade de 0-0,05 m, foi possível observar correlação positiva da produtividade com a PT ($r= 0,43$), AC ($r=0,49$), Ca ($r=0,62$) e V% ($r=0,45$) e correlação negativa com a DS ($r= -0,42$) e PR ($r= -0,71$). Entre as propriedades físicas foi possível observar que a correlação positiva mais evidente na camada superficial foi entre a CA e Mac ($r= 0,75$), e a maior correlação negativa foi entre a DS e a PT ($r= -0,59$), enquanto entre as propriedades químicas foi possível observar que a correlação positiva mais evidente foi entre a Ca e V% ($r= 0,91$). Na profundidade de 0,25-0,30 m, a produtividade se

correlacionou de forma significativa com a RP ($r = -0,64$) e com V% ($r = 0,46$). Entre as propriedades físicas foi possível observar que a correlação positiva mais evidente em profundidade foi entre a Mac e CA ($r = 0,95$), e a maior correlação negativa foi entre BD e Mac ($r = -0,90$) enquanto entre as propriedades químicas foi possível observar que a correlação positiva mais evidente foi entre a Ca e Mg ($r = 0,88$).

Para o cultivo de milho 2019/20, nas duas profundidades de solo avaliadas, nenhuma correlação foi observada entre os atributos físicos do solo e a produtividade. No entanto, os atributos químicos do solo correlacionaram-se positivamente com a produtividade nas duas profundidades, sendo que pH ($r = 0,57$), Ca ($r = 0,43$) e Mg ($r = 0,49$) na profundidade de 0-0,05 m e Mg ($r = 0,45$) na profundidade de 0,25-0,30 m.

3.2 Produtividade das culturas

A produtividade de todos os tratamentos para cada um dos nove cultivos avaliados está apresentada na Figura 4. De maneira geral, a influência exclusivamente do PO na produtividade dos cultivos, isto é, sem considerar os efeitos de tipo de cultura e do volume de chuvas (Tabela 1 e Figura 1), foi mais conclusiva nos dois cultivos iniciais do experimento. No primeiro cultivo de verão após PO houve resposta estatisticamente significativa, com aumento de produtividade de soja em relação ao tratamento controle para todos os tratamentos independente dos implementos utilizados. Destaca-se o aumento de 24% do NTSDL (4.751 kg/ha) em relação ao controle (3.819 kg/ha). A resposta positiva em aumento de produtividade se repetiu por mais um cultivo de verão (milho), com diferença estatística segundo teste de scott knott ($p > 0,05$) para NTC e NTSDL. A partir do cultivo de verão de 2017/2018 os tratamentos de PO implicaram produtividades diferentes entre si.

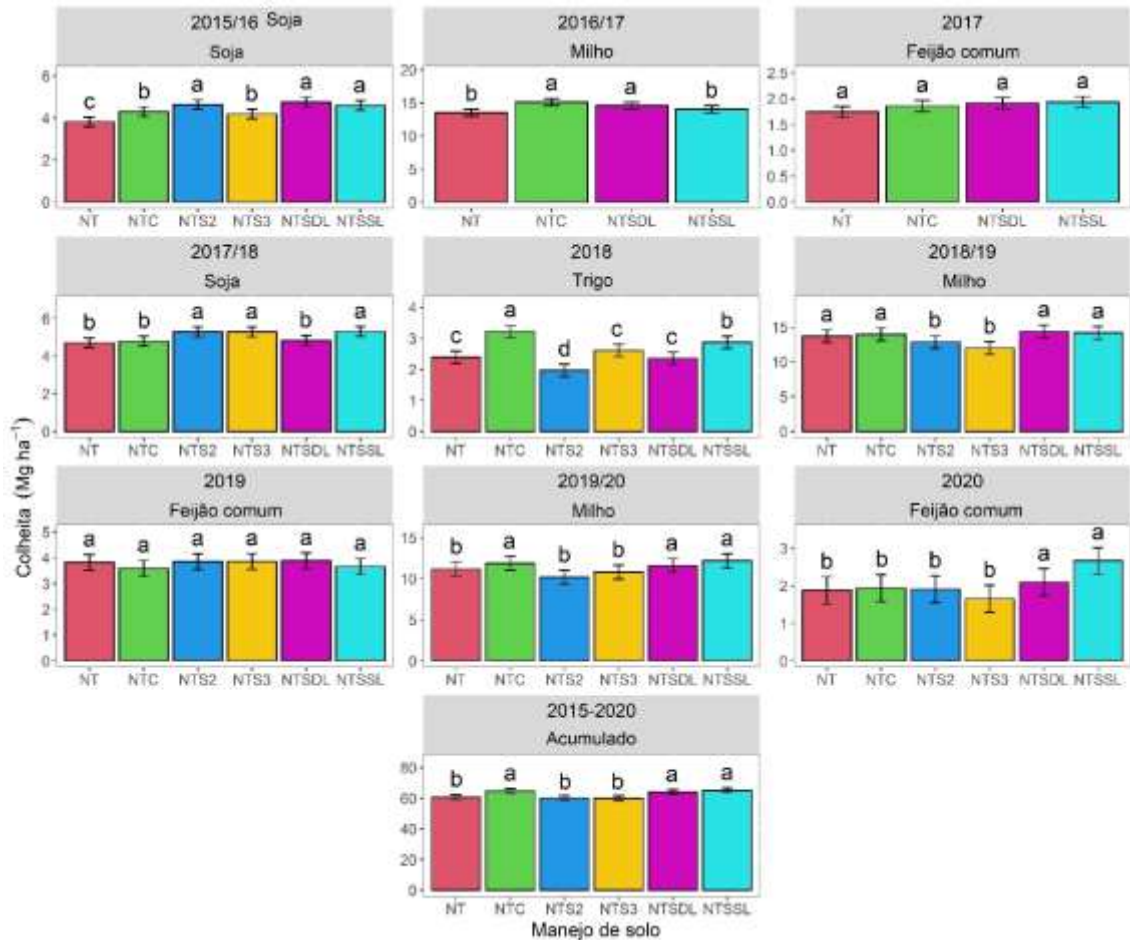


Figura 4. Produtividade das culturas para cada um dos cultivos avaliados. Os valores médios seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). NT – SPD contínuo; NTS2 - SPD subsolado a cada 2 anos (2015/2017/2020); NTS3- SPD subsolado a cada 3 anos (2015/2018); NTSSL - SPD subsolado em 2015 + aplicação de calcário em superfície; NTSDL - SPD em 2015 + aplicação de calcário na profundidade entre 40 – 60 cm; NTC – SPD escarificado em 2015. Nos cultivos de milho 2016/17 e feijão comum 2017 não foi possível realizar a colheita dos tratamentos NTS2 e NTS3.

O tratamento que recebeu escarificação (NTC) mostrou efeito na produtividade vegetal dependente do tipo de cultura, isto é, nos cultivos que foram colhidos os grãos de gramíneas (milho e trigo) a produtividade média foi maior em relação ao tratamento controle com diferença estatística nos cultivos de milho 2016/17, trigo 2018 e milho 2019/20 (Figura 4). Por outro lado, nos cultivos que foram colhidos os grãos de leguminosas (soja e feijão) a produtividade média do tratamento NTC foi menor em relação aos demais tratamentos de PO. O efeito positivo da escarificação no rendimento de grãos foi evidenciado até a safra 2018, apresentando assim uma duração de 36 meses após o preparo.

A partir do cultivo de trigo 2018 as diferenças em produtividade se acentuaram entre os tratamentos que utilizaram o subsolador Ikeda® (NTSSL; NTS2; NTS3) (Figura 4), sendo que a partir deste momento foi observado um declínio de eficiência produtiva dos tratamentos NTS2

e NTS3 em relação ao tratamento NTSSL, este último com média significativamente superior em 4 dos 5 cultivos a partir de 2018. O tratamento NTS2 apresentou uma redução de produtividade na safra 2018 (trigo), um ano após ter recebido a segunda subsolagem, sendo que, até então, vinha apresentando médias de produtividade superiores ao tratamento controle. O efeito negativo da subsolagem na produtividade de NTS2 também foi observado no cultivo 2018/19. O tratamento NTS3 subsolado em 2018 também apresentou uma redução em produtividade no cultivo de 2018/19, indicando que a operação foi prejudicial a produtividade. As reduções em produtividade coincidiram com os cultivos pós subsolagem nos tratamentos NTS2 e NTS3, indicando que a adoção de frequência de operações pré-estabelecida foi prejudicial a produtividade das culturas. Para o acumulado total dos 9 cultivos avaliados (2015-2020) (Figura 4), os tratamentos com uso de frequência pré-estabelecida de PO (NTS2; NTS3) apresentaram os piores desempenhos entre os demais tratamentos de PO (NTC, NTSDL e NTSSL), que apresentaram maior rendimento acumulado de grãos.

O tratamento NTSDL se mostrou pouco sensível a sazonalidade dos cultivos (culturas diferentes e estações climáticas diferentes) e apresentou um declínio gradativo de produtividade até o cultivo de trigo 2018. A partir deste cultivo, o tratamento NTSDL demonstrou uma recuperação de seu potencial produtivo, encerrando o experimento entre os maiores acumulados de grãos. Esse comportamento corrobora com o observado na Figura 3, em que as propriedades físicas se correlacionaram de maneira mais intensa com a produtividade no início do experimento e as propriedades químicas no final, já que o tratamento NTSDL recebeu uma única subsolagem em 2015 com uma adição de calcário em subsuperfície.

De maneira geral as maiores rentabilidades em relação ao tratamento controle estiveram associadas aos tratamentos mecanizados uma única vez em 2015, com destaque para a subsolagem em relação a escarificação (Figura 5). O tratamento NTSSL se mostrou o mais rentável em comparação ao NT, proporcionando uma diferença de US\$ 1.923,00 por hectare. Por outro lado, os tratamentos em que foi adotada uma frequência pré-estabelecida de subsolagem (NTS2; NTS3) se mostraram os menos rentáveis, sendo que o tratamento NTS3 chegou ao final do experimento em prejuízo de US\$ 85,20/ha em relação ao tratamento controle (Figura 5).



Figura 5. Diferença relativa na receita líquida para cada tratamento de PO em comparação ao tratamento controle sob plantio direto sem intervenção mecânica no acumulado de cinco anos. O custo das operações de subsolagem e escarificação foram de US\$ 37,00 ha⁻¹ e US\$ 30,00 ha⁻¹ cada, respectivamente. A receita líquida total para cada tratamento foi calculada considerando as médias das cotações nacionais (BRL) no mês de setembro de 2021 (Milho: US\$ 16,50/sc; Soja: US\$ 31,00/sc; Feijão comum: US\$ 47,00/sc; Trigo: US\$ 275,00/Mg) e os custos operacionais de cada tratamento ao longo de 5 anos. NT – SPD contínuo (não plotado, valor zero de referência comparativa); NTS2 - SPD subsolado cada 2 anos; NTS3- SPD subsolado a cada 3 anos; NTSSL - SPD subsolado em 2015 + aplicação de calcário em superfície; NTSDL - SPD subsolado em 2015 + aplicação de calcário na profundidade entre 40 – 60 cm; NTC – SPD escarificado em 2015.

4. Discussão

4.1 Efeitos do OT na nas propriedades do solo e seus reflexos na produtividade.

O aumento de produtividade (Figura 4) em função do PO para todos os tratamentos no primeiro cultivo demonstrou que a intervenção mecânica no SPD foi, num primeiro momento, benéfica do ponto de vista de crescimento vegetal devido ao alívio de compactação, o que pode ser constatado pelas correlações significativas entre a produtividade de soja no cultivo 2015/16 e os indicadores físicos DS, PT e RP (Figura 3). Destaca-se a redução da RP de 2,76 para 1,22 MPa ao comparar o NTSSL com o NT (controle) na profundidade de 0,25-0,30 (Tabela 2), logo $RP < 2,0$ e considerada adequada para não limitar crescimento radicular conforme Bengough et al. (2011). Assim, além da redução da resistência mecânica no ano de 2015\16, houve melhoria da CA, dois fatores físicos que diretamente se relacionam com o potencial produtivo das plantas (Letey, 1985). O PO além da redução DS pode aumentar a taxa de infiltração de água no solo pela subsolagem (Singh et al., 2019a) ou pela escarificação (Nunes et al., 2019a;

Peixoto et al., 2020), melhorando o fluxo de água e nutrientes no solo para as plantas. Diferentemente da subsolagem, sobre o PO feito com a escarificação já se tem informações de melhoria em indicadores de crescimento radicular, como volume, densidade e comprimento de raízes (Moraes et al., 2020; Nunes et al., 2019b). Contudo, neste trabalho a resposta positiva em produtividade devido ao PO ocorreu independentemente do tipo de implemento (subsolador ou escarificador) e corrobora com o observado por Peixoto et al. (2019a, 2019b) em trabalhos anteriores na mesma área experimental.

Ao analisar a meta-análise de Peixoto et al. (2020), a resposta positiva em produtividade tem ocorrido quando da utilização de subsoladores em áreas sob SPD contínuo por 5-10 anos, condição esta que se encaixa neste estudo. Além disso, os autores enfatizam a necessidade de um diagnóstico acurado de compactação, o qual também foi realizado na área do presente estudo por Peixoto et al. (2019a) em 2015, constatando que a área apresentava problemas de compactação, e, corrobora a redução de RP (Tabela 2) nos tratamentos com PO em relação ao controle, observados em 2015/16. Nenhum tratamento apresentou média de produtividade acumulada abaixo do tratamento controle (Figura 4), indicando que a área apresentava uma compactação que limitava o máximo potencial produtivo, que foi solucionado pelos tratamentos de PO.

A persistência dos efeitos de alívio estrutural foi de no mínimo 18 meses (novembro/2015 a março/2017) quando se considera o aumento de produtividade devido ao PO nos cultivos de soja de 2015/16 e milho de 2016/17, bem como a ausência de diferença de produtividade para o cultivo de feijão de 2017 (Figura 4). A literatura indica que a resposta das plantas em aumento de produtividade devido ao preparo ocasional pode não ocorrer e que, quando ocorre, tem duração de até 24 meses após o preparo (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO et al., 2020). Entretanto, nos cultivos de soja 2017/18, trigo 2018, milho 2019/20 e feijão 2020 ainda pode-se observar maior produtividade para NTSSL e NTSDL quando comparado ao controle, resultando em maior produtividade acumulada (Figura 4). Considerando que o efeito de alívio estrutural decorrente das subsolagens não persistiu na segunda avaliação física (Tabela 2), as produtividades maiores em NTSDL e NTSSL em relação ao tratamento controle (NT) podem ser decorrentes das propriedades químicas do solo, que passaram a ter maior correlação com a produtividade no final do experimento, uma vez que ambos os tratamentos fizeram uso de calcário. Esse efeito tardio da calagem corrobora com o trabalho de Caires et al. (2005) que avaliou a eficácia da aplicação superficial de calcário em solos sobre SPD, aonde os autores observaram que os efeitos da aplicação de doses de calcário

tanto no pH quanto no Al trocável foram significativos até 10 anos após a calagem, e que o aumento nos níveis de Ca e Mg trocável na profundidade de 0,10 a 0,20 m se deu entre 2,5 e 5 anos após a calagem. Além disso, três cultivos após a PO de 2015, as diferenças em produtividade podem ter sido influenciadas mais fortemente pelo tipo de cultura e pela condição hídrica nos tratamentos mecanizados uma única vez.

Considerando que durante o ciclo da cultura, as exigências hídricas de milho, feijão, soja e trigo são em média de 650, 300, 650 e 270 mm respectivamente (EMBRAPA, 2007a, 2007b; CARVALHO et al., 2013), o cultivo de trigo 2018 foi o único que teve chuvas abaixo do volume ideal para o máximo desempenho da cultura (32 mm) (Figura 1), apresentando as maiores variações de médias entre os tratamentos, com o maior destaque positivo do tratamento NTC em relação aos demais, dentre todos os cultivos avaliados, seguido pelo tratamento NTSSL (Figura 4). Destaca-se também que neste cultivo, o pior desempenho foi do tratamento NTS2, que utilizou a maior frequência pré-estabelecida de subsolagem e no momento do cultivo de trigo 2018 já havia passado pela segunda operação de PO no ano anterior. Os demais cultivos não passaram por déficit hídrico no total acumulado durante o ciclo da cultura (Figura 1). As variações entre as médias dos tratamentos ter sido mais evidente no cultivo com a menor incidência de chuvas, corrobora com o observado em metanálise por Peixoto et al. (2020), onde condições de escassez hídrica resultaram em resposta positiva da PO em produtividade.

O maior rendimento produtivo acumulado dos tratamentos NTC, NTSDL e NTSSL em comparação ao tratamento controle (Figura 4) vai na contramão do observado em revisão por Blanco-Canqui e Wortmann (2020), na qual a maior parte dos estudos não demonstram aumento de produtividade em função do PO, e os efeitos nos lucros das fazendas não foram evidentes. Os autores demonstram ainda que os efeitos positivos do PO na produção, a menos que estejam associados ao controle de ervas daninhas ou outro benefício, não parecem ser consistentes ou grandes o suficiente para justificar prática do PO. Porém, a Figura 5 revelou uma diferença relativa na receita líquida de U\$1.212,2 ha⁻¹ para NTC, U\$1.305,00 ha⁻¹ para NTSDL e U\$1.923,00 ha⁻¹ para NTSSL em comparação ao NT (controle) no acumulado dos cinco anos de experimento, demonstrando que o PO promoveu um aumento do lucro da fazenda. Singh et al. (2019b) também observaram vantagens econômicas na cultura do trigo para o PO, com benefícios brutos variando na faixa de U\$1.313,9 ha⁻¹ a U\$1.384,1 ha⁻¹ sobre o tratamento controle (U\$1.072,6 ha⁻¹) e revelando um benefício de no mínimo US\$241,3 ha⁻¹.

A produtividade acumulada do tratamento NTC foi igual às médias dos tratamentos NTSDL e NTSSL (Figura 4) e pode estar relacionada ao efeito de sazonalidade observado neste

tratamento, especialmente no cultivo de trigo de 2018, ou ainda o uso de subsoladores não se sobrepôs ao escarificador no aumento de produtividade das culturas. Observa-se que nos cultivos em 2016/17 e 2018/19 com milho e em 2018 com trigo, a escarificação foi igual ou melhor que o uso de subsoladores (Figura 4), o que pode estar associada a menor profundidade de mobilização do solo ter sido suficiente ao sistema radicular dessas plantas e a disponibilidade de água ter sido adequada. O efeito de sazonalidade na produtividade do tratamento NTC corrobora com o trabalho de Secco et al. (2009), que também observaram uma associação entre o tipo de cultura e a produtividade em áreas escarificadas, sendo que para soja o rendimento de grãos não diferiu entre áreas compactadas e as parcelas escarificadas do experimento, enquanto para o milho a escarificação do solo aumentou o rendimento de grãos. Conyers et al. (2019) concluíram que os efeitos sazonais e a sequência das culturas tiveram um efeito maior na produtividade do que o preparo do solo. Contudo, mesmo não havendo diferença entre as produtividades acumuladas em virtude do uso dos implementos, o fato do tratamento NTSSL ter superado em US\$ 617,7 o tratamento NTSDL e em US\$ 710,8 o tratamento NTC (Figura 5) deixa claro que houve um melhor desempenho dos subsoladores sobre o escarificador, especialmente o subsolador Ikeda[®], no que diz respeito à produtividade e rentabilidade.

Quando comparadas as produtividades dos tratamentos NTSSL e NTSDL, todos mecanizados apenas uma vez em 2015 com subsoladores distintos (Ikeda[®] e Kamak[®] respectivamente), foi possível observar que o tratamento NTSDL apresentou maiores produtividades em um primeiro momento (cultivos em 2015/16 e 2016/17) em relação aos tratamentos NTSSL, corroborando com a maior CA (Tabela 2) para o tratamento NTSDL na profundidade de 0-0,05 m no primeiro ano de avaliação. Ou ainda, a maior média de produtividade observada em NTSDL em comparação a NTSSL nos primeiros cultivos pode ser justificado pela diferença entre as ponteiras utilizadas e a profundidade de trabalho dos implementos (Kumar e Thakur, 2005). O subsolador Ikeda[®] utiliza ponteiras aladas, mais agressivas para revolver o solo, do que a ponteira utilizada no subsolador Kamak[®], que é do tipo cuneiforme. Essa diferença entre a intensidade com que os implementos perturbam o solo, pode gerar uma distinção na condutividade hidráulica do solo não saturado (K) entre os tratamentos NTSSL e NTSDL, sendo que o solo mais solto do tratamento NTSSL pode promover uma redução na K , que justificaria a menor produtividade neste tratamento nos primeiros cultivos. Apesar do preparo profundo promover aumento da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) (Yang et al., 2021a), o alívio mecânico da estrutura do solo e a eventual destruição de bioporos pode causar reduções significativas de K (Dexter et al., 2004).

Liu et. al. (2021) reportaram que o trigo cultivado em solo compactado teve um melhor desenvolvimento vegetativo e reprodutivo ao ser comparado ao trigo cultivado no solo não compactado nos anos mais secos. Entretanto, no presente trabalho, a produtividade no cultivo de trigo 2018, que apresentou deficit hídrico, foi maior para o tratamento NTSSL (Figura 4), indicando que os efeitos de alívio estrutural mais intensos promovidos pelo subsolador Ikeda[®] foram mais duradouros, e, positivos quanto ao aumento de produtividade do trigo. Isso fica claro quando se observa o aumento significativo de RP a 0-0,05 m, a maior média de DS a 0-0,05 m em NTSDL em comparação ao NTSSL, bem como a redução da média de CA a 0-0,05 m (Tabela 2) em NTSDL em comparação ao NTSSL, ambos no segundo ano de avaliação.

4.2 Efeitos da frequência pré-estabelecida de subsolagem nas propriedades do solo e na produtividade de grãos.

Considerando apenas os tratamentos que utilizaram o subsolador Ikeda[®], o fato do NTSSL (subsulado em 2015) ter superado os tratamentos que fizeram uso de frequência preestabelecida de subsolagem (NTS2 e NTS3) na produtividade acumulada total (Figura 4) deixa explícito que o uso de frequência de subsolagem não foi benéfico a produtividade das culturas. Segundo Blanco-Canqui e Wortmann (2020) um aumento da frequência de preparo do solo influi negativamente sobre o conteúdo de água no solo e a capacidade do solo em reter água, enquanto Dang et al. (2018) não observaram diferenças significativas no rendimento de grãos com o aumento da frequência de operação de PO. Observando os atributos físicos, não houve diferenças significativamente positivas dos tratamentos que utilizaram frequência de subsolagem (NTS2; NTS3) sobre o tratamento subsulado uma única vez (NTSSL) que justifique a adoção de frequência pré-estabelecida de OP.

O tratamento NTS2 apresentou uma redução de produtividade no cultivo 2018 (trigo), um ano após ter recebido a segunda subsolagem, indicando que a subsolagem do ano de 2017 foi prejudicial, uma vez que o tratamento NTS2 vinha apresentando médias de produtividade superiores ao tratamento controle antes da subsolagem. Os sucessivos preparos do solo podem resultar na formação de camadas compactadas (Cavalcanti et al., 2019; de Lima et al., 2020), que podem reduzir significativamente o suprimento de água para as plantas (Horn et al., 2019). O efeito negativo da subsolagem na produtividade de NTS2 também foi observado no cultivo de 2018/19. O tratamento NTS3, subsulado em 2018, também apresentou uma redução em produtividade no cultivo de 2018/19, indicando que a operação foi prejudicial à produtividade. As reduções em produtividade coincidem com os cultivos pós subsolagem nos tratamentos

NTS2 e NTS3, indicando que a adoção de uma frequência de operações pré-estabelecida não foi benéfica para o rendimento de grãos. Além disso, do ponto de vista econômico, o tratamento NTS3 foi o único que apresentou desempenho negativo em comparação ao tratamento controle (NT) (Figura 5) deixa explícito que as operações de PO dependem de um correto diagnóstico prévio para que se obtenha bom resultado produtivo (PEIXOTO et al., 2019c, 2019a).

Analisando cultivo a cultivo, o tratamento NTSSL teve média produtiva superior ao tratamento controle em 5 dos 9 cultivos avaliados, sendo um deles o cultivo de feijão 2020, e em nenhum cultivo esteve abaixo do tratamento controle, indicando assim que os efeitos positivos da subsolagem na produtividade perduraram até o final do experimento, e que do ponto de vista produtivo não seria necessária a frequência de subsolagem adotada em NTS2 e NTS3, para o intervalo de tempo analisado. Além disso, a maior produtividade acumulada do tratamento NTSSL em relação aos tratamentos de frequência de PO (NTS2 e NTS3) (Figura 4), indica que o uso de PO associado a calagem superficial foi mais eficiente que a frequência preestabelecida em proporcionar aumento de produtividade. Dos atributos físicos, os que mais sofreram oscilações em função da frequência de subsolagem foram a CA e Mac no primeiro ano de avaliação e a Mac no segundo ano de avaliação (Tabela 2). Isso indica que mesmo a subsolagem podendo aumentar a porosidade total do solo logo após a operação (Yang et al., 2021b), a reconsolidação em NTS2 e NTS3 se deu de forma mais intensa do que em NTSSL. A reconsolidação do solo em curto prazo afeta significativamente a condição estrutural do solo (Reichert et al., 2017).

5. Conclusões

O preparo ocasional em solo sob NT consolidado promoveu melhoria da qualidade física do solo com aumento de produtividade de grãos de duração direta de 18 meses, e algum efeito residual benéfico na produtividade ao longo dos 5 anos de experimento, principalmente aqueles que passaram por uma única operação de PO.

O momento de maior restrição hídrica do experimento, (cultivo de trigo 2018) foi o qual os efeitos do PO sobre a produtividade foram mais conclusivos, sendo possível distinguir neste cultivo as diferenças entre implementos, frequências pré-estabelecidas e o tratamento controle, evidenciando que o PO afeta a produtividade de grãos de forma mais contundente quando há déficit hídrico.

Os equipamentos utilizados na subsolagem (Escarificador Stara Fox[®], Subsolador Kamak[®] e Subsolador Ikeda[®]) exerceram influência somente na persistência dos efeitos de alívio estrutural, com a subsolagem se mostrando ligeiramente mais eficiente que a escarificação, especialmente do ponto de vista econômico. Quando ao acumulado de produção ao final do experimento, não houve diferença entre os implementos.

A adoção de frequência de preparo pré-estabelecida se mostrou não só ineficaz para a melhoria da qualidade física do solo, mas também prejudicial a produtividade das culturas, uma vez que os tratamentos que fizeram uso de frequência apresentaram o pior desempenho produtivo no acumulado dos 9 cultivos dentre todos os tratamentos, inclusive o tratamento controle.

6. Referências bibliográficas

- Arshad, M.A., Martin, S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88, 153–160. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3)
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T. a, 2011a. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of experimental botany* 62, 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T. a, 2011b. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of experimental botany* 62, 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Beylich, A., Oberholzer, H.R., Schrader, S., Höper, H., Wilke, B.M., 2010. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research* 109, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.010>
- Blanco-Canqui, H., Ruis, S.J., 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Blanco-Canqui, H., Wortmann, C.S., 2020. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. *Soil and Tillage Research* 198, 104534. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104534>
- Carlesso, L., Beadle, A., Cook, S.M., Evans, J., Hartwell, G., Ritz, K., Sparkes, D., Wu, L., Murray, P.J., 2019. Soil compaction effects on litter decomposition in an arable field: Implications for management of crop residues and headlands. *Applied Soil Ecology* 134, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.10.004>
- Cavalcanti, R.Q., Rolim, M.M., de Lima, R.P., Tavares, U.E., Pedrosa, E.M.R., Gomes, I.F., 2019. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil and Tillage Research* 189, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.006>

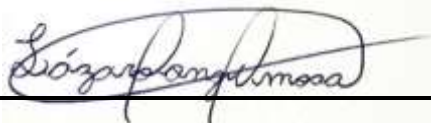
- Cecagno, D., Costa, S.E.V.A., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., Carvalho, P.C.F., 2016. Least limiting water range and soybean yield in system under different grazing intensities. *Soil & Tillage Research* 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>
- CONAB, 2020. Safra 2019/20: Décimo segundo levantamento, Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2019/2020.
- Conyers, M., van der Rijt, V., Oates, A., Poile, G., Kirkegaard, J., Kirkby, C., 2019. The strategic use of minimum tillage within conservation agriculture in southern New South Wales, Australia. *Soil and Tillage Research* 193, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.021>
- Dang, Y.P., Balzer, A., Crawford, M., Rincon-Florez, V., Liu, H., Melland, A.R., Antille, D., Kodur, S., Bell, M.J., Whish, J.P.M., Lai, Y., Seymour, N., Carvalhais, L.C., Schenk, P., 2018. Strategic tillage in conservation agricultural systems of north-eastern Australia: Why, where, when and how? *Environmental Science and Pollution Research* 25, 1000–1015. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8937-1>
- Dang, Y.P., Moody, P.W., Bell, M.J., Seymour, N.P., Dalal, R.C., Freebairn, D.M., Walker, S.R., 2015. Strategic tillage in no-till farming systems in Australia's northern grains-growing regions: II. Implications for agronomy, soil and environment. *Soil and Tillage Research* 152, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.013>
- de Lima, R.P., Tormena, C.A., Figueiredo, G.C., da Silva, A.R., Rolim, M.M., 2020. Least limiting water and matric potential ranges of agricultural soils with calculated physical restriction thresholds. *Agricultural Water Management* 240, 106299. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106299>
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., Hongwen, L., 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3, 1–25. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025>
- Devine, S., Markewitz, D., Hendrix, P., Coleman, D., 2014. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades. *PLoS ONE* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084988>
- Dexter, A.R., Czyz, E.A., Gaę, O.P., 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research* 79, 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.007>
- Eze, S., Dougill, A.J., Banwart, S.A., Hermans, T.D.G., Ligowe, I.S., Thierfelder, C., 2020. Impacts of conservation agriculture on soil structure and hydraulic properties of Malawian agricultural systems. *Soil and Tillage Research* 201, 104639. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104639>
- Federação Brasileira do sistema plantio direto, 2021. Evolução da área sob plantio direto no Brasil [WWW Document]. Área sob Plantio Direto. URL <https://febrapdp.org.br/download/14588evolucao-pd-no-bbasil-2021-jpg.jpg> (accessed 12.7.21).
- Ferreira, D.F., Filho, A.C., Lúcio, A.D., 2012. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. *Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa* 37, 16–19.

- Filipovic, D., Kosutic, S., Gospodaric, Z., Zimmer, R., Banaj, D., 2006. The possibilities of fuel savings and the reduction of CO₂ emissions in the soil tillage in Croatia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 115, 290–294. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.013>
- Fiorini, A., Boselli, R., Maris, S.C., Santelli, S., Ardeni, F., Capra, F., Tabaglio, V., 2020. May conservation tillage enhance soil C and N accumulation without decreasing yield in intensive irrigated croplands? Results from an eight-year maize monoculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 296, 106926. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106926>
- Frey, B., Kremer, J., Rüdte, A., Sciacca, S., Matthies, D., Lüscher, P., 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology* 45, 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.05.006>
- Graves, A.R., Morris, J., Deeks, L.K., Rickson, R.J., Kibblewhite, M.G., Harris, J.A., Farewell, T.S., Truckle, I., 2015. The total costs of soil degradation in England and Wales. *Ecological Economics* 119, 399–413. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.026>
- Horn, R., Domzwał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., van Ouwerkerk, C., 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research* 35, 23–36. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00479-C](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00479-C)
- Horn, R., Holthausen, D., Dörner, J., Mordhorst, A., Fleige, H., 2019. Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil and Tillage Research* 195, 104388. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388>
- Jamali, H., Nachimuthu, G., Palmer, B., Hodgson, D., Hundt, A., Nunn, C., Braunack, M., 2021. Soil compaction in a new light: Know the cost of doing nothing – A cotton case study. *Soil and Tillage Research* 213, 105158. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105158>
- Jayaraman, S., Dang, Y.P., Naorem, A., Page, K.L., Dalal, R.C., 2021. Conservation agriculture as a system to enhance ecosystem services. *Agriculture (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080718>
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., 2019. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies* 76, 29–51. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., Or, D., 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research* 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Kumar, A., Thakur, T.C., 2005. An investigation into comparative test of conventional and winged subsoilers, in: 2005 ASAE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI. <https://doi.org/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., 2014. Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India. *Soil and Tillage Research* 140, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.03.005>

- Letey, J., 1985. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Advances in Soil Science. Soil Sci.* 1, 277–294. <https://doi.org/10.1097/00010694-199005000-00010>
- Liu, H., Colombi, T., Jäck, O., Keller, T., Weih, M., 2021. Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. *Science of The Total Environment* 807, 150763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150763>
- Liu, X., Peng, C., Zhang, W., Li, S., An, T., Xu, Y., Ge, Z., Xie, N., Wang, J., 2022. Subsoiling tillage with straw incorporation improves soil microbial community characteristics in the whole cultivated layers: A one-year study. *Soil and Tillage Research* 215, 105188. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105188>
- Lozano, L.A., Soracco, C.G., Villarreal, R., Ressia, J.M., Sarli, G.O., Filgueira, R.R., 2016. Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 40, 1–12. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150160>
- Melero, S., Panettieri, M., Madejón, E., Macpherson, H.G., Moreno, F., Murillo, J.M., 2011. Implementation of chiselling and mouldboard ploughing in soil after 8 years of no-till management in SW, Spain: Effect on soil quality. *Soil and Tillage Research* 112, 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.12.001>
- Moraes, M.T. de, Debiassi, H., Franchini, J.C., Mastroberti, A.A., Levien, R., Leitner, D., Schnepf, A., 2020. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil and Tillage Research* 200, 104611. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>
- Nunes, M.R., Denardin, J.E., Pauletto, E.A., Faganello, A., Pinto, L.F.S., 2015. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil and Tillage Research* 148, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.007>
- Nunes, M.R., Pauletto, E.A., Denardin, J.E., Luis, L.E.A., van Es, H.M., 2019a. Dynamic changes in compressive properties and crop response after chisel tillage in a highly weathered soil. *Soil and Tillage Research* 186, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.017>
- Nunes, M.R., Pauletto, E.A., Denardin, J.E., Luis, L.E.A., van Es, H.M., 2019b. Dynamic changes in compressive properties and crop response after chisel tillage in a highly weathered soil. *Soil and Tillage Research* 186, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.017>
- Peixoto, D.S., Silva, B.M., de Oliveira, G.C., Moreira, S.G., da Silva, F., Curi, N., 2019a. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research* 194, 104307. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>
- Peixoto, D.S., Silva, B.M., Godinho Silva, S.H., Karlen, D.L., Moreira, S.G., Pereira da Silva, A.A., Vilela de Resende, Á., Norton, L.D., Curi, N., 2019b. Diagnosing, Ameliorating, and Monitoring Soil Compaction in No-Till Brazilian Soils. *Agrosystems, Geosciences & Environment* 2, 1–14. <https://doi.org/10.2134/age2018.09.0035>
- Peixoto, D.S., Silva, L. de 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., 2020. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment* 745, 140887. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140887>

- Reichert, J.M., Brandt, A.A., Rodrigues, M.F., da Veiga, M., Reinert, D.J., 2017. Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? *Geoderma* 301, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.012>
- Reichert, J.M., Eduardo, L., Sanches, A., Jose, D., Horn, R., Ha, I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research*, 102, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Tan, C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017>
- Santos, G.A. dos, Dias Junior, M. de S., Guimarães, P.T.G., Furtini Neto, A.E., 2005. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. *Ciência e Agrotecnologia* 29, 740–752. <https://doi.org/10.1590/s1413-70542005000400005>
- Schlüter, S., Großmann, C., Diel, J., Wu, G.M., Tischer, S., Deubel, A., Rücknagel, J., 2018. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. *Geoderma* 332, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.001>
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., Seidel, S.J., 2017. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and Tillage Research* 174, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.005>
- Secco, D., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Da Silva, V.R., 2009. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ciencia Rural* 39, 58–64. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000100010>
- Shukla, M.K., Lal, R., 2005. Erosional effects on soil organic carbon stock in an on-farm study on Alfisols in west central Ohio. *Soil and Tillage Research* 81, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.006>
- Singh, A., Phogat, V.K., Dahiya, R., Batra, S.D., 2014. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research* 140, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.03.002>
- Singh, K., Choudhary, O.P., Singh, H.P., Singh, A., Mishra, S.K., 2019a. Sub-soiling improves productivity and economic returns of cotton-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research* 189, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.013>
- Singh, K., Choudhary, O.P., Singh, H.P., Singh, A., Mishra, S.K., 2019b. Sub-soiling improves productivity and economic returns of cotton-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research* 189, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.013>

- Soane, B.D., van Ouwerkerk, C., 1995a. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research* 35, 5–22. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00475-8](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00475-8)
- Soane, B.D., van Ouwerkerk, C., 1995b. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research* 35, 5–22. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00475-8](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00475-8)
- Soil Survey Staff, 2014. *Keys to soil taxonomy* (12th ed.). DC: Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. 12, 410.
- STOLF, R., 1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. *Revista brasileira de ciência do solo* 15, 229–235.
- Suzuki, L.E.A.S., Reichert, J.M., Reinert, D.J., Lima, C.L.R. de, 2007. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42, 1159–1167. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2007000800013>
- Szatanik-Kloc, A., Horn, R., Lipiec, J., Siczek, A., Szerement, J., 2018. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. *Soil and Tillage Research* 175, 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.016>
- Yadav, G.S., Das, A., Babu, S., Mohapatra, K.P., Lal, R., Rajkhowa, D., 2021. Potential of conservation tillage and altered land configuration to improve soil properties, carbon sequestration and productivity of maize based cropping system in eastern Himalayas, India. *International Soil and Water Conservation Research* 9, 279–290. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.12.003>
- Yang, Y., Wu, J., Zhao, S., Mao, Y., Zhang, J., Pan, X., He, F., van der Ploeg, M., 2021a. Impact of long-term sub-soiling tillage on soil porosity and soil physical properties in the soil profile. *Land Degradation and Development* 32, 2892–2905. <https://doi.org/10.1002/ldr.3874>
- Yang, Y., Wu, J., Zhao, S., Mao, Y., Zhang, J., Pan, X., He, F., van der Ploeg, M., 2021b. Impact of long-term sub-soiling tillage on soil porosity and soil physical properties in the soil profile. *Land Degradation and Development* 32, 2892–2905. <https://doi.org/10.1002/ldr.3874>
- Zhang, S., Li, Q., Lü, Y., Sun, X., Jia, S., Zhang, X., Liang, W., 2015. Conservation tillage positively influences the microflora and microfauna in the black soil of Northeast China. *Soil and Tillage Research* 149, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.001>



Mestrando: Lázaro Longue Mosa



Orientador: Bruno Montoani Silva

Lavras – MG
30 de maio de 2022