

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATUAÇÃO DAS PONTEIRAS DE HASTE SULCADORA DE SEMEADORAS
DE PLANTIO DIRETO EM ARGISSOLO COM NÍVEIS DE TRÁFEGO**

Leonardo Pereira Fortes
(Dissertação de Mestrado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATUAÇÃO DAS PONTEIRAS DE HASTE SULCADORA DE SEMEADORAS
DE PLANTIO DIRETO EM ARGISSOLO COM NÍVEIS DE TRÁFEGO**

LEONARDO PEREIRA FORTES
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

Dissertação apresentada como um dos
requisitos à obtenção do Grau de Mestre em
Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Abril de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Fortes, Leonardo Pereira

Atuação das ponteiras de haste sulcadora de
semeadoras de plantio direto em Argissolo com níveis
de tráfego / Leonardo Pereira Fortes. -- 2023.

51 f.

Orientador: Michael Mazurana.

Coorientador: Getulio Coutinho Figueiredo.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2023.

1. qualidade do sulco de semeadura. 2. força de
tração. 3. mecanismo sulcador. 4. manejo físico do
solo. I. Mazurana, Michael, orient. II. Figueiredo,
Getulio Coutinho, coorient. III. Título.


LEONARDO PEREIRA FORTES
Engenheiro Agrônomo - UFRGS.

DISSERTAÇÃO


Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de
MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre(RS),Brasil


Aprovado em: 03/04/2023
Pela Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 MICHAEL MAZURANA
Data: 25/04/2023 12:55:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


MICHAEL MAZURANA
Orientador-PPG Ciência do Solo
UFRGS

Documento assinado digitalmente
 GETULIO COUTINHO FIGUEIREDO
Data: 18/04/2023 09:32:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

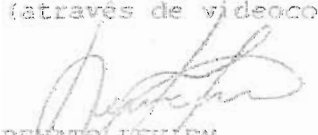
GETULIO COUTINHO FIGUEIREDO
Coorientador -- PPG Ciência do Solo/UFRGS

Documento assinado digitalmente
 JONATAN MÜLLER
Data: 25/04/2023 11:53:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


JONATAN MÜLLER
IFRS
(através de videoconferência)

Documento assinado digitalmente
 OSNIAR CONTE
Data: 19/04/2023 22:00:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


OSNIAR CONTE
EMBRAPA Trigo
(através de videoconferência)


RENATO LEVIEN
Aposentado do Departamento de Solos
UFRGS
(através de videoconferência)

Homologado em: 04/05/2023
Por

Documento assinado digitalmente
 ALBERTO VASCONCELOS INDA JUNIOR
Data: 04/05/2023 13:59:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ALBERTO VASCONCELOS INDA JR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo

Documento assinado digitalmente
 CARLOS ALBERTO BISSANI
Data: 04/05/2023 14:41:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado. À Estação Experimental Agronômica da UFRGS pela estrutura física para desenvolvimento das atividades de pesquisa e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos durante parte do curso.

Ao Professor Michael Mazurana, pela dedicação, confiança, liberdade e orientação para desenvolver as atividades de pesquisa, com momentos importantes de troca de ideias que contribuíram muito para a minha formação e para a realização desse trabalho.

Aos professores Getulio Coutinho Figueiredo, Renato Levien e Moacir Tuzzin de Moraes pelas valiosas contribuições e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores que participaram da minha caminhada, dos quais tive o privilégio de ser aluno. Todas as contribuições foram muito positivas para minha formação pessoal e profissional.

Aos bolsistas de iniciação científica, Anna, Cátia e Claiton que muito contribuíram na coleta de dados, facilitando o trabalho no campo e laboratório. Aproveito para agradecer aos funcionários da Estação Experimental Agronômica, Euzébio e Jonatan pelo auxílio nas atividades de campo.

Ao Dionata, grande amigo, colega de graduação, mestrado e de apartamento, pela ótima convivência de sempre, muito alegre e divertida, com muito incentivo em todos os momentos. Obrigado pelas inúmeras conversas e discussões sobre o estudo de mestrado, as disciplinas e sobre a vida! Gracias por tudo meu compadre!

Aos colegas do PPG, que foram essenciais ao longo desses dois anos de aulas, seminários e cafés com muita troca de experiência, que auxiliaram na minha formação acadêmica e pessoal.

Um agradecimento muito especial à Marina, minha companheira, pelo carinho, incentivo e apoio para continuar em todos os momentos, inclusive me acompanhando à campo em muitas atividades de coleta e processamento de dados, em meio à pandemia, quando não havia mão de obra suficiente. Muito obrigado por entender, em todos os momentos que não pude estar presente, em função do trabalho e estudo, e dedico essa conquista a ti! Muito obrigado!

À minha família, meus pais pelo incentivo em continuar estudando e buscando meus sonhos, pelo apoio em todos os momentos e aos meus irmãos, que sempre estão preparados para dar o suporte que preciso e ser a base sólida que vocês são.

A todos vocês: Muito obrigado!

ATUAÇÃO DAS PONTEIRAS DE HASTE SULCADORA DE SEMEADORAS DE PLANTIO DIRETO EM ARGISSOLO COM NÍVEIS DE TRÁFEGO¹

Autor: Leonardo Pereira Fortes

Orientador: Prof. Dr. Michael Mazurana

Coorientador: Prof. Dr. Getulio Coutinho Figueiredo

Resumo

Hastes sulcadoras têm sido utilizadas em semeadoras-adubadoras para mobilizar o solo e aliviar a compactação em sistema plantio direto. Entretanto, pouco se sabe sobre o efeito das ponteiras da haste sulcadora sobre as características do sulco, na demanda energética da operação de semeadura e produtividade de soja. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho operacional de hastes sulcadoras com diferentes angulações de ponteiras em semeadora-adubadora e a resposta produtiva da soja, em níveis crescentes de compactação de um Argissolo Vermelho sob sistema plantio direto. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 6 x 2 (6 níveis de tráfego x 2 tipos de ponteira da haste sulcadora), com 3 blocos. O fator nível de compactação foi composto por seis níveis de tráfego controlado de trator (solo escarificado há oito anos, plantio direto sem tráfego, e níveis crescentes de 2, 4, 8 e 12 passadas de trator na totalidade da parcela). O fator ponteira da haste sulcadora foi composto por diferentes angulações de ataque ao solo (18° e 26°). Foram realizadas medições de força de tração, consumo de combustível específico, consumo de combustível operacional, patinagem dos rodados do trator, seção transversal do sulco de semeadura, profundidade máxima do sulco de semeadura, qualidade física do solo no sulco de semeadura, emergência de plantas, estande final de plantas e produtividade da soja. Os resultados indicam que a ponteira com maior ângulo de ataque (26°) aumenta a força de tração, o consumo de combustível e as dimensões do sulco de semeadura (profundidade e seção transversal). A patinagem das rodas traseiras foi reduzida no sistema plantio direto trafegado com oito passadas de trator. Apesar de haver uma regressão linear significativa entre o estande de plantas e a resistência do solo à penetração na parede do sulco, tal resistência (até ~3 MPa) no fundo e na parede do sulco não foi limitante para o estabelecimento e produtividade da cultura da soja. A produtividade de grãos de soja foi aumentada com uso de ponteira na haste sulcadora com o menor ângulo de ataque (18°). A redução do ângulo de ataque da ponteira de 26° para 18° diminuiu a mobilização do solo, a demanda de energia e o consumo de combustível. O uso de ponteiras com 18° de ângulo de ataque na haste sulcadora amenizou os efeitos da resistência do solo no tratamento com maior grau de compactação (oito passadas de trator) e não limitou a emergência e a produtividade da soja em Argissolo.

Palavras-chave: qualidade do sulco de semeadura, força de tração, mecanismo sulcador, manejo físico do solo

¹Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (51p.) Abril, 2023. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

PERFORMANCE OF SHANK TINES OF SEEDING DRILL IN NO-TILL AT AN ULTISOL WITH TRAFFIC LEVELS²

Author: Leonardo Pereira Fortes

Adviser: Prof. Dr. Michael Mazurana

Co-advisor: Prof. Dr. Getulio Coutinho Figueiredo

Abstract

Tine furrow openers have been used in drill seeders to mobilize the soil and alleviate the effects of soil compaction in cultivated areas. Although still unknown how different rake angles of tines in no-tillage affect seedbed characteristics, the energy demand of the seeding operation, and soybean productivity. Therefore, this study aimed to evaluate the operational performance of tine furrow openers with different rake angles in the seedbed soil physical quality and soybean yield response in compaction levels of an Ultisol under no-tillage. The experimental design was a randomized block design with three blocks in a 6x2 factorial scheme (6 traffic levels x 2 tine types). The factor of soil compaction level was comprised of six tractor-traffic levels (soil was chiseled eight years ago, continuous no-tillage, and increasing levels of 2, 4, 8, and 12 tractor passes in all area of the plot). The factor of tine furrow openers was comprised by different rake angles (18 and 26°). Measurements of draft force, specific fuel consumption, operational fuel consumption, tractor wheel slip, furrow cross-section, mean furrow depth, soil physical quality in the seedbed, plant emergence, plant stand, and soybean grain yield were performed. Our findings indicated that the highest tine rake angle (26°) increases the draft force, fuel consumption, and the dimensions of sowing furrow (depth and cross-section). Wheel slippage was reduced under no-tillage previously trafficked under eight tractor passes. Despite a significant linear regression of plant stand and soil penetration resistance in the seedbed wall, the soil penetration resistance (up to ~3 MPa) in the bottom and wall of the seedbed were not limiting for the soybean crop parameters. Soybean grain yield was increased due to shank furrow openers with the lowest tine rake angle (18°). The reduction of rake angle of tine from 26° to 18° decreased soil mobilization, energy demand, and fuel consumption. Use of tine furrow openers up to 18° of rake angle mitigated the soil compaction from up to eight tractor passes in an Ultisol, thus the soil strength not limited the soybean emergence and yield.

Keywords: seedbed quality, draft force, furrow openers, soil compaction

²Masters Dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (51p.) April, 2023. This research was sponsored by CNPq.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Produção de grãos em sistema plantio direto no Brasil	4
2.2 Compactação do solo em sistema plantio direto	7
2.3 Caracterização da semeadura em sistema plantio direto	9
2.4 Ferramentas de abertura do sulco de semeadura	11
2.4.1 Mecanismos sulcadores utilizados em semeadoras.....	12
2.4.2 Escolha do mecanismo sulcador	14
3. IMPACT OF TINE RAKE ANGLE ON SOIL MOBILIZATION, ENERGY DEMAND, AND SOYBEAN YIELD UNDER NO-TILLAGE TRAFFICKED IN AN ULTISOL	18
3.1 Introduction	18
3.2 Material and methods	20
3.2.1 Location, background, and experimental design	20
3.2.2 Sowing and crop management.....	22
3.2.3 Data acquisition instrumentation	23
3.2.4 Soil physical attributes and sowing furrow characteristics	24
3.2.5 Statistical analysis	26
3.3 Results and discussion	27
3.3.1 Physical soil properties.....	27
3.3.2 Draft requirements.....	28
3.3.3 Fuel consumption and slippage.....	30
3.3.4 Soil groove mobilization.....	31
3.3.5 Soil strength in the seedbed	33
3.3.6 Plant parameters and its relation to seedbed physical quality	34
3.4 Conclusions	38
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.
APÊNDICES.....	50

RELAÇÃO DE TABELAS

Table 1. Soil physical attributes in the topsoil layers of an Ultisol cultivated under no-tillage with different traffic levels.	28
Table 2. Draft force, specific fuel consumption, operational fuel consumption, and wheel-slip under no-tillage with traffic levels and tine furrow openers.....	29
Table 3. Furrow cross-section, maximum furrow depth, and disturbance index under no-tillage with traffic level and tine furrow openers.	32
Table 4. Soil penetration resistance in the furrow wall (SPR_w) and in the furrow bottom (SPR_b) as a function of compaction levels and tine types.....	33
Table 5. Soybean crop development (emergence, plant stand) and grain yield under traffic levels and tines furrow openers.	35

RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Mecanismos sulcadores do tipo discos duplos defasados (A) e haste sulcadora (B). Fonte: Hernani; Loureiro (2011). 13
- Figura 2.** Influência do ângulo de ataque ao solo da ponteira da haste sulcadora na abertura do sulco. Adaptado de Solhjou; Fielke; Desbiolles (2012) e Barr *et al.* (2018)..... 16
- Figura 3.** Representação esquemática das regiões de abertura do sulco com ação da haste sulcadora. Adaptado de Godwin; Spoor (1977)..... 16
- Figure 4.** Weather data (rainfall, and minimum, and maximum temperatures) during the soybean season growth of 2021/2022 (days after seeding on November 29, 2021).21
- Figure 5.** Schematic representation of tine furrow opener with 26° (T_{26°}) and 18° (T_{18°}) rake angle with soil.22
- Figure 6.** Soil penetration resistance measurement at two positions in the seedbed (a), on the wall (i) (b), and at the bottom (ii) (c). The arrows indicate the direction of penetration test. The circles indicate the evaluation points.26
- Figure 7.** Impact of the type of furrower stem tip on the relationship between the draft force with bulk density (A) and soil penetration resistance (B) in the 0–0.15 m soil layer. T_{26°} is the tine furrow opener with 26° rake angle. T_{18°} is the tine furrow opener with 18° rake angle.30
- Figure 8.** Relationship of macroporosity and soil penetration resistance in the wall (0.05 – 0.10 m layer) (a) and bottom (0.10 – 0.15 m layer) of seedbed of an Ultisol under no-tillage.34
- Figure 9.** Relationship of soil penetration resistance measured in the bottom (a,c,e) and in the wall (b,d,f) of seedbed in relation to emergence (a,b) plant stand (c,d) and soybean yield (e,f) in an Ultisol.37

RELAÇÃO DE APÊNDICES

Apêndice 1. Atributos químicos do solo para os níveis de tráfego na camada de 0–20 cm.	50
Apêndice 2. Croqui do experimento de estudos em compactação do solo utilizado para obtenção dos dados deste estudo.	51

1. INTRODUÇÃO GERAL

O sistema plantio direto (SPD) caracteriza-se como um sistema de produção sustentável, baseado no mínimo revolvimento do solo, manutenção de cobertura permanente e rotação de culturas. Esse conceito de sistema produtivo, associado a práticas complementares de conservação do solo, como terraceamento, redução e/ou controle do tráfego de máquinas e incremento de carbono no solo via plantas permite que ocorram, simultaneamente, a produção agrícola e a preservação do solo, da água e da biodiversidade (POSSAMAI *et al.*, 2022). A adoção do sistema plantio direto em sua essência é base para a redução da erosão do solo, mesmo sob condições de alta intensidade das chuvas (OLIVEIRA; WENDLAND; NEARING, 2012), além de aumentar o estoque de carbono orgânico do solo (VELOSO *et al.*, 2018), melhorando sua estrutura física e formando uma rede de bioporos e poros contínuos, que potencializam a infiltração e armazenagem de água no solo (MONDAL; CHAKRABORTY, 2022).

Nas últimas décadas, com o uso parcial do sistema plantio direto e a baixa adoção de práticas complementares de conservação do solo, surgiram alguns desafios, como a estratificação de nutrientes no perfil e o aumento do estado de compactação, especialmente em camadas subsuperficiais (0,07 a 0,20 m) (NUNES *et al.*, 2015). A compactação subsuperficial afeta o acesso das plantas à água e nutrientes, restringindo-o à camada mais superficial do solo, o que pode resultar em perdas de produtividade das culturas, especialmente em anos com déficit hídrico. Alternativas para aliviar a compactação são discutidas na literatura, como o uso de plantas de cobertura (BERTOLLO *et al.*, 2021),

manejo ocasional do solo com escarificação (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO *et al.*, 2020) e o uso de semeadoras-adubadoras equipadas com hastes sulcadoras de ação profunda (>0,15 m) (NUNES *et al.*, 2014, 2015).

A atuação das hastes sulcadoras em profundidades além da camada compactada rompe o solo e gera caminhos preferenciais, pelos quais as raízes exploram o solo em camadas subsuperficiais antes não exploradas, acessando água e nutrientes (CONTE *et al.*, 2011; DRESCHER *et al.*, 2017; NUNES *et al.*, 2015). Portanto, o uso de hastes sulcadoras tem resultado em melhoria da qualidade física do solo (TORMENA *et al.*, 2008), identificada pela redução da densidade do solo (NUNES *et al.*, 2014) e da resistência mecânica à penetração (FERREIRA *et al.*, 2023; VEIGA *et al.*, 2007). Nesse cenário, a escolha da ponteira da haste sulcadora é relevante, tendo em vista que suas características são determinantes na abertura do sulco e formação de ambiente adequado para a germinação da semente e crescimento das plantas (AIKINS *et al.*, 2020).

A influência do uso de hastes sulcadoras sobre a produtividade de grãos é documentada na literatura com resultados sinalizando aumentos de produtividade de soja (CONTE *et al.*, 2009; FERREIRA *et al.*, 2023) e de milho (BERTONHA *et al.*, 2015; FURLANI *et al.*, 2013), enquanto outros estudos não observaram aumentos significativos (HERZOG; LEVIEN; TREIN, 2004). Essa variação indica a influência de outros fatores na produtividade das culturas, especialmente da dinâmica da água em sistema de cultivo sem uso de irrigação, como o volume e a regularidade das chuvas (MULAZZANI *et al.*, 2022). Adicionalmente, o uso de hastes sulcadoras requer maior força de tração, exigindo tratores maiores e mais potentes, resultando em maior consumo de combustível (MCLAUGHLIN; CAMPBELL; OWEN, 2019) e, em muitos casos, promove aumento da compactação do solo (KELLER *et al.*, 2019).

A atuação de mecanismos ativos das semeadoras no solo, como as ponteiras das hastes sulcadoras e sua influência na abertura do sulco de semeadura é escassa na literatura, sobretudo em situações com variabilidade no grau de compactação. Adicionalmente, análises que englobam parâmetros de máquina agrícola, do solo e da planta, são pouco exploradas nessas condições, havendo carência de estudos, especialmente em áreas de produção sob SPD. Assim, a hipótese deste trabalho é que o uso de hastes sulcadoras com ponteiras de maior ângulo de ataque em semeadora-adubadora aumenta a

mobilização de solo, a demanda energética da operação de semeadura e a produtividade de grãos de soja sob sistema plantio direto em Argissolo Vermelho. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho operacional de hastes sulcadoras com diferentes angulações da ponteira em uma semeadora-adubadora e a resposta produtiva da soja, em níveis crescentes de tráfego em um Argissolo Vermelho cultivado em sistema plantio direto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção de grãos em sistema plantio direto no Brasil

O sistema plantio direto (SPD), introduzido no Brasil na década de 70, foi uma alternativa para minimizar os efeitos da erosão em solos da região Sul, manejados sob preparo convencional. Os principais componentes, conhecidos como princípios do SPD, são: (i) revolvimento mínimo do solo, restrito à linha de semeadura; (ii) manutenção de cobertura do solo ao longo de todo o ano e; (iii) diversidade de espécies, obtida via rotação de culturas (POSSAMAI *et al.*, 2022). Com o passar do tempo e desenvolvimento de pesquisas científicas aplicadas, associadas a transferência de informações e treinamento de profissionais e produtores, o SPD se tornou um complexo de práticas de manejo do solo fundamentais para a manutenção da sustentabilidade do sistema de produção (KOCHHANN; DENARDIN, 2000).

A crescente adoção dos produtores ao SPD resultou em muitos benefícios ao sistema. A mínima mobilização do solo, associada à rotação de culturas, favorece o acúmulo de carbono orgânico no solo (BAYER *et al.*, 2000), a gênese e estabilização de agregados (VELOSO *et al.*, 2018), a formação de uma rede de poros contínua e interconectada que promove o crescimento radicular (STIRZAKER; PASSIOURA; WILMS, 1996; WENDEL *et al.*, 2022), a infiltração de água e a ciclagem de nutrientes no solo (BAYER *et al.*, 2000; BLANCO-CANQUI *et al.*, 2011). O somatório desses benefícios vem possibilitando aumento da sustentabilidade da agricultura, aliada à redução de

custos, fatores que tornam a agricultura brasileira uma das mais sustentáveis e competitivas do mundo (FUENTES-LLANILLO *et al.*, 2021).

As estatísticas oficiais de adoção do SPD são escassas em nível mundial, e no Brasil não é diferente. A partir de dados da Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP, 2018), a área com cultivo de cereais e oleaginosas em SPD no país era de, aproximadamente, 33 milhões de hectares na safra 2017/18, o que representa cerca de 70% da área total utilizada com essas culturas que, em 2020, foi de 47 milhões de hectares (IBGE, 2021). Fuentes-Llanillo *et al.* (2021) estudaram a evolução da área em SPD no Brasil com base nos dados oficiais do IBGE³, coletados no Censo Agropecuário. Nesse levantamento, os autores encontraram um aumento de 85% da área total em SPD, de 17,8 para 33 milhões de hectares, dos anos de 2006 para 2017, respectivamente. Esse levantamento indica que no período de inverno foram cultivados apenas 18,5 milhões de hectares, apontando para o uso de pousio em pelo menos 14,5 milhões de hectares (44%), sem a manutenção de rotação de culturas, prática essencial para o SPD (BERTOLLO *et al.*, 2021; NUNES *et al.*, 2018; PEIXOTO *et al.*, 2020).

Entre os princípios do SPD, a rotação de culturas é apontada como o principal fator para promoção da qualidade do solo do ponto de vista químico, físico e biológico (BERTOLLO *et al.*, 2021; FRANCHINI *et al.*, 2011), em complemento aos demais princípios, idealizados especialmente para reduzir a erosão do solo. A diversificação de espécies na mesma área possibilita a exploração de diferentes camadas do solo, ciclando e reciclando nutrientes (ADETUNJI *et al.*, 2020), adicionando carbono por meio de biomassa vegetal de parte aérea e raízes (REDIN *et al.*, 2018), formando bioporos estáveis e contínuos no solo (HAN; KAUTZ; KÖPKE, 2016) e aumentando o diâmetro de agregados (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2011), o que resulta em melhorias da estrutura física do solo (TORMENA *et al.*, 2008).

Embora de suma importância, as estatísticas oficiais de adoção do SPD são obtidas de forma superficial, apenas questionando o tipo de sistema de manejo do solo utilizado, sem entrar no mérito conceitual da expressão “sistema plantio direto”. Assim, a área reportada em SPD inclui as variações do termo,

³ IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística responsável pelo provimento de informações geográficas e estatísticas no território brasileiro.

que não necessariamente incluem os pilares do SPD (POSSAMAI *et al.*, 2022). Telles *et al.* (2022) ao entrevistar um grupo de 234 produtores rurais na região Oeste do Estado do Paraná, concluíram que a maior parte não apresenta conhecimentos suficientes dos conceitos da agricultura conservacionista, o que resulta em baixa adoção do SPD de forma adequada, a luz de seu conceito como sistema conservacionista. Martins *et al.* (2018) indicam que dos 33 milhões de ha apontados pelo IBGE, apenas 10% sejam manejados conforme as premissas do SPD. Essa simplificação do sistema, embora facilite as operações na propriedade rural, têm provocado problemas de manejo ao longo dos anos, resultando em diminuição da qualidade do solo, como a estratificação de nutrientes no perfil, o aumento do estado de compactação e a potencialização da erosão do solo (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; NUNES *et al.*, 2014, 2015; POSSAMAI *et al.*, 2022). Isso afeta a estabilidade produtiva e a resiliência do sistema, frente às adversidades impostas pelas variações climáticas, como a ocorrência de períodos de estiagem.

Os reflexos negativos de realizar um SPD deficiente em práticas de manejo preocupam, especialmente no Rio Grande do Sul, onde dos 6,6 milhões de hectares cultivados com soja e milho, apenas 0,23 milhão são irrigados (aproximadamente 3,5%), indicando que 96,5% das áreas de produção dependem da ocorrência de chuvas (BONETTI *et al.*, 2020). Conforme apontado por Avila *et al.* (1996), nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, as chances de a evapotranspiração potencial da cultura ser maior que a precipitação pluvial é de 60%, indicando alta frequência de ocorrência de déficit hídrico nos meses de verão, época em que as principais culturas de grãos estão em período de produção. Nessas condições, a irregularidade das chuvas se torna um dos fatores-chave para as perdas de produtividade, visto que deficiência hídrica no período crítico da cultura pode resultar em perdas de até 86% da produtividade de milho (MENEGATI, 2013; SERPA *et al.*, 2012) e de 15 a 90% para a soja (KUSS *et al.*, 2008; RUGERI *et al.*, 2022; SENTELHAS *et al.*, 2015). Por outro lado, solos bem manejados, seguindo os preceitos do SPD associados a práticas conservacionistas, como o uso de plantas de cobertura, semeadura em nível e terraços podem contribuir para o desenvolvimento da cultura. Freitas *et al.* (2021) indicam que as práticas conservacionistas acima citadas contribuem positivamente para infiltração e armazenagem de água no solo, tornando-o um

reservatório de água com capacidade de disponibilizar a demanda hídrica da cultura por períodos mais prolongados, reduzindo prejuízos com estiagens.

2.2 Compactação do solo em sistema plantio direto

A compactação de solos agrícolas ocorre quando a capacidade de suporte de carga do solo é excedida e há a deformação do solo devido a ações antrópicas, como o tráfego de máquinas e pastejo intensivo de animais, (CUNHA; CASCÃO; REIS, 2009; HÅKANSSON; REEDER, 1994). Os principais fatores que influenciam no aumento do grau de compactação são a magnitude da pressão aplicada ao solo e o teor de água no momento da aplicação da carga, resultando em aumento da densidade do solo em detrimento do espaço poroso, especialmente dos macroporos (OBOUR; UGARTE, 2021). Assim, em condições de solo com umidade acima da faixa de consistência friável, o tráfego de máquinas ou pastejo com alta carga animal pode resultar em aumento do estado de compactação do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005).

No SPD a compactação se concentra em camadas subsuperficiais, especialmente entre 0,07 e 0,20 m (NUNES *et al.*, 2014), resultando em aumentos da densidade do solo, da resistência mecânica do solo à penetração, com conseqüente redução dos macroporos e dos fluxos de ar e de água no solo (BONETTI *et al.*, 2017; MAZURANA *et al.*, 2017; NUNES *et al.*, 2014; REICHERT *et al.*, 2009). Em áreas cultivadas sob SPD, a compactação nessa camada de solo (0,07–0,20 m) implica na limitação do sistema radicular das plantas, que fica confinado na camada mais superficial (0–0,07 m). Conseqüentemente, isso reduz a extração de água de camadas subsuperficiais (LIPIEC; ARVIDSSON; MURER, 2003). Esse fenômeno é observado principalmente em épocas de estiagens prolongadas, quando as plantas não acessam a água disponível abaixo da camada compactada, potencializando perdas de produtividade em SPD (COLOMBI *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2022; MULAZZANI *et al.*, 2022).

Solos com algum grau de compactação, quando cultivados com plantas, podem afetar uma série de estruturas e rotas metabólicas das plantas. Um dos temas mais estudados do ponto de vista vegetal é o desenvolvimento radicular, que tem o crescimento influenciado negativamente, de forma exponencial, pelo aumento da resistência mecânica do solo à penetração (MORAES; GUSMÃO, 2021), alterando o tamanho, formato e anatomia da raiz

(MORAES *et al.*, 2020). As limitações no crescimento radicular geram um efeito cascata no metabolismo da planta, pois com menor área radicular e alterações morfológicas, a absorção de nutrientes é prejudicada (WANG *et al.*, 2019). Além disso, a disponibilidade de água no solo é apontada como o principal fator que afeta o desenvolvimento radicular (MORAES; GUSMÃO, 2021). Os autores encontraram redução de 60% na taxa relativa de alongação radicular em soja quando o potencial mátrico chegou a valores próximos a -500 kPa. O resultado desse estudo, contextualizado à região Sul do Brasil, que apresenta a disponibilidade de água como o fator mais limitante para produção de soja (SENTELHAS *et al.*, 2015) aponta para a necessidade de entender e criar estratégias para mitigar as questões relacionadas à redução da disponibilidade hídrica no solo, como a sua compactação.

A recuperação física do solo, após a compactação, é um processo variável em função do tipo de solo, grau de compactação, condições climáticas e de manejo do solo e das culturas sendo, na maioria das vezes, lento. O alívio dos efeitos da compactação pode ocorrer de forma natural, a partir de ciclos de umedecimento e secagem (BONETTI *et al.*, 2017) e potencializado com a utilização de plantas de cobertura (BERTOLLO *et al.*, 2021), devido à maior formação de bioporos nos locais de crescimento das raízes (HAN *et al.*, 2015). Adicionalmente, operações mecânicas de manejo do solo são associadas à descompactação, como o uso de semeadoras-adubadoras com hastes sulcadoras de ação profunda (0,10 a 0,17 m) (NUNES *et al.*, 2014, 2015) e escarificação (0,20 a 0,30 m) em manejo ocasional (CALONEGO *et al.*, 2017; PEIXOTO *et al.*, 2019). Os benefícios do manejo ocasional do solo com escarificação ainda não são bem consolidados, visto que, em muitos casos, não apresentam incremento de produtividade, como observado por Peixoto *et al.* (2020) ao avaliar 68 artigos sobre o tema. Nesse estudo, incrementos de produtividade foram observados apenas para situações com restrição hídrica. Entretanto, foi observada redução da erosão hídrica do solo, em virtude da melhoria em indicadores da qualidade física do solo, como infiltração de água, macroporosidade, densidade do solo e resistência mecânica do solo à penetração, com persistência por períodos de até 24 meses. Os autores concluem que muitos dos desafios observados em SPD surgem com o uso parcial dos princípios que regem esse sistema conservacionista de manejo do

solo. Desse modo, a utilização das práticas de manejo de forma adequada reduzem a probabilidade de problemas de ordem física, química e biológica ocorrer e aumentam os benefícios em nível de sistema.

Para a avaliação da ocorrência de compactação, parâmetros físicos têm sido largamente utilizados, como a densidade do solo, macroporosidade, porosidade total e resistência do solo à penetração (GUBIANI; REINERT; REICHERT, 2014; KELLER *et al.*, 2015; MORAES *et al.*, 2014). Embora consolidados na literatura e úteis em avaliações de campo, essas técnicas físicas são laboriosas e, em escala de campo, muitas vezes são de difícil implementação. Nesse âmbito, o desenvolvimento e validação de ferramentas para determinação de parâmetros operacionais do conjunto mecanizado são cada vez mais importantes, incluindo tecnologias que se alinham com o conceito de agricultura digital (PURCELL; NEUBAUER, 2022). O uso de sensores conhecidos como extensômetros elétricos (ou *strain gauges*) na haste sulcadora, além de avaliar a força de tração demandada pela haste sulcadora, vem apresentando resultados satisfatórios como ferramenta útil no mapeamento do grau de compactação de solos agrícolas (ASKARI *et al.*, 2016; CEPIK, 2006; CONTE *et al.*, 2011). Assim, o diagnóstico de compactação do solo tende a ser mais rápido, menos oneroso e escalável em nível operacional, facilitando os processos de tomada de decisão.

2.3 Caracterização da semeadura em sistema plantio direto

A semeadura de culturas em SPD exigiu a adaptação das semeadoras, anteriormente utilizadas em preparo convencional, para semear em solo com cobertura vegetal. Para isso, o principal componente agregado às semeadoras foi o disco de corte de palha, que possibilitou a semeadura sem embuchamento e a permanência do solo coberto, tendo como resultados a redução da erosão, da perda de água por evaporação, da regulação da temperatura do solo e controlando a emergência de plantas daninhas (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006).

Nesse contexto, a semeadura da cultura é uma prática fundamental, pois, além de ser o momento em que inicia a definição de um dos componentes de rendimento (número de plantas por área), é também momento de criar as condições físicas e químicas para que as sementes germinem, apresentem boa

emergência e tenham um crescimento adequado. Conforme Murray; Tullberg; Basnet (2006), as semeadoras-adubadoras desempenham um papel complexo e fundamental na semeadura das culturas em SPD, como: (i) a abertura do sulco de semeadura em variáveis condições de campo; (ii) mínima mobilização do solo, de modo a proporcionar deposição da semente e fertilizante em profundidade e distância adequadas; (iii) a deposição de semente e fertilizante com distribuição longitudinal precisa e uniforme; (iv) a cobertura das sementes com quantidade de solo suficiente, com bom contato semente-solo, melhorando a transferência de umidade para o processo de germinação; (v) evitar mobilização excessiva da palhada na superfície; (vi) a interação entre sulcos e; (vii) a compactação adequada do solo no sulco. A operacionalização do processo de semeadura depende de uma série de fatores, como as condições do terreno (declividade e uniformidade da lavoura), a umidade do solo, a velocidade de deslocamento e as ferramentas de abertura de sulco.

A eficiência de corte dos resíduos que cobrem o solo reduz problemas na operação de semeadura, como o embuchamento do equipamento com os resíduos e o envelopamento da semente na palhada, o que reduz a germinação. Para obter a eficiência de corte necessária, os discos de corte de palha devem estar em bom estado de conservação, com transferência adequada de pressão da estrutura da semeadora para o disco, o que evita os problemas de plantio supracitados (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006). Além disso, nesse processo, o solo atua como uma superfície rígida com força contrária ao disco, funcionando como uma contra faca. Assim, umidade do solo acima da condição de friabilidade na semeadura reduz a força de reação do solo contra o disco, fazendo com que a palha apenas dobre e seja empurrada para o interior do sulco, formando bolsas de palha e ar, impossibilitando o contato solo-semente, a absorção de umidade e a germinação adequada da semente (AIKINS *et al.*, 2020). Nesse sentido, o disco de corte de palha deve ser adequado caso a caso, para cada tipo de cobertura, quantidade de palha e raízes na camada de ação do disco e a condição de umidade do solo deve ser avaliada para a obtenção de uma semeadura com qualidade.

A semeadura em solo com consistência plástica resulta em maior propensão à ocorrência de compactação do solo pelos rodados do trator, além de aumentar a aderência do solo aos componentes da semeadora. Isso pode

causar variações na profundidade de semeadura, visto que com a aderência de solo às rodas limitadoras de profundidade seu diâmetro aumenta, diminuindo a profundidade de deposição da semente. Assim, a umidade ideal para realização da semeadura é na faixa de consistência friável, quando o solo apresenta resistência às forças externas de compressão, umidade suficiente para germinação da semente e melhores condições para o manejo, com adequado fraturamento do solo no sulco de semeadura (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006).

Adicionalmente, a operação de semeadura é influenciada pela velocidade de semeadura, especialmente em relação à mobilização de solo no sulco e distribuição uniforme de sementes. Quanto maior a velocidade de semeadura, maior é a expulsão de solo do interior do sulco para a superfície (DESBIOLLES, 2004). Isso pode influenciar a uniformidade de deposição da semente, especialmente para culturas com baixo espaçamento entre linhas, como o trigo. Nesse caso, o uso de alta velocidade de semeadura associada à alta mobilização do mecanismo sulcador, pode expulsar o solo de um sulco sobre o outro, aumentando a profundidade da semente de forma excessiva. Conforme Desbiolles (2004), variações na profundidade de deposição de sementes e profundidade excessiva (acima de 0,04 m), causam redução da produtividade do trigo. Assim, a velocidade e a mobilização de solo no sulco devem ser levadas em consideração no momento de semeadura para evitar emergência desuniforme e resultados negativos na produtividade da cultura.

2.4 Ferramentas de abertura do sulco de semeadura

Os mecanismos sulcadores das semeadora-adubadoras são componentes-chave no processo de semeadura direta. Com ação no solo, promovem a abertura do sulco de semeadura, depositando o fertilizante e proporcionando condições adequadas à deposição de sementes e posterior estabelecimento da cultura.

Os mecanismos sulcadores necessitam cumprir uma série de requerimentos, classificados como funcionais e operacionais (MURRAY; TULLBERG; BASNET, 2006). Os requerimentos funcionais são relacionados a sua atuação no solo, como abertura do sulco, deposição de fertilizantes na profundidade adequada, uniforme ao longo da linha e entre as linhas de

semeadura, causar mínima mobilização do solo, permitindo que o solo flua de volta ao sulco cobrindo a semente e, não deve promover compactação excessiva do fundo e das laterais do sulco. Os requerimentos operacionais caracterizam-se como a estrutura do elemento sulcador e da semeadora-adubadora que serão base para o cumprimento adequado dos requerimentos funcionais. Dentre os quais, temos a manutenção de uma posição constante na direção de trabalho, o ajuste vertical para alteração da profundidade de ação com controle eficiente da profundidade, o ajuste da posição horizontal para alteração do espaçamento entre linhas e desempenhar de forma adequada suas funções em diferentes tipos de solo e cobertura.

Existem diversos tipos de mecanismos abridores de sulcos, com aplicações para variadas situações de campo, com alteração especialmente da sua geometria, que determina as feições da abertura do sulco e criação de uma região com boas condições para a germinação e crescimento inicial das plantas (AIKINS *et al.*, 2020).

2.4.1 Mecanismos sulcadores utilizados em semeadoras

Existem relatos de diversos mecanismos abridores de sulco sendo utilizados na agricultura, desde os tradicionais, como discos e hastes sulcadoras com inúmeros formatos, ângulos de trabalho, largura e profundidade de ação (AIKINS *et al.*, 2020; CHAUDHURI, 2001; MCLAUGHLIN; CAMPBELL; OWEN, 2019) até sistemas mais recentes que utilizam jatos de água pressurizada (DESBIOLLES; TAKI; BUTLER, 2020). No Brasil, os principais mecanismos utilizados para abrir o sulco de semeadura são os discos duplos defasados (Figura 1A) e as hastes sulcadoras (Figura 1B), os quais possuem geometria e princípio de ação distintos, entregando resultados naturalmente diferentes em campo (FRANCETTO *et al.*, 2016; LEVIEN *et al.*, 2011).

O mecanismo de discos duplos defasados normalmente é composto por dois discos planos montados com uma angulação em direção ao sentido de trabalho, promovendo o corte dos resíduos, do solo e o deslocamento do solo para baixo e para os lados (MURRAY; TULLBERG; BASNET, 2006). A mobilização do solo é alterada em função do diâmetro dos discos, da angulação em relação à direção de trabalho e da transferência de pressão da estrutura da semeadora (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006). Os discos duplos defasados

são empregados devido sua baixa demanda energética, visto que apresentam menor mobilização de solo em relação às hastes sulcadoras, o que resulta em menor requerimento de tração e consumo de combustível (LEVIEN *et al.*, 2011; MCLAUGHLIN; CAMPBELL; OWEN, 2019). Nesse caso, com a mesma fonte de energia é possível tracionar maior número de linhas de semeadura simultaneamente, aumentando o rendimento operacional. Entretanto, em solos argilosos e com a presença de compactação superficial, a semente pode ser depositada junto ao adubo, prejudicando os processos de germinação e emergência (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006), bem como criando um leito de semeadura pouco efetivo para o desenvolvimento inicial da cultura.

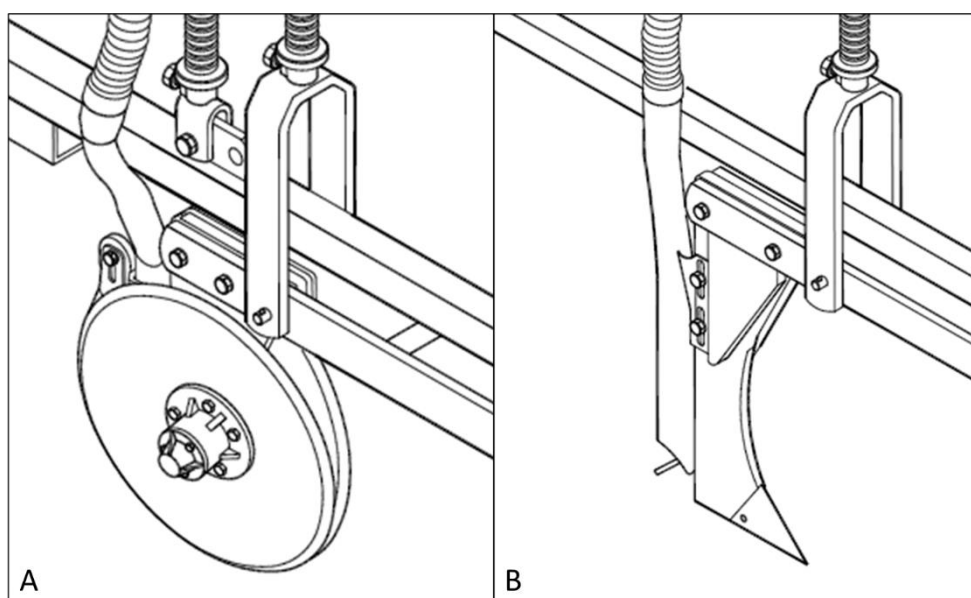


Figura 1. Mecanismos sulcadores do tipo discos duplos defasados (A) e haste sulcadora (B). Fonte: Hernani; Loureiro (2011).

As hastes sulcadoras, por sua vez, rompem o solo com a atuação de uma ponteira, que penetra no solo por sucção, devido ao ângulo de ataque formado em relação ao sentido de trabalho. Juntamente com o ângulo de ataque, os principais fatores inerentes à haste sulcadora na formação do sulco de semeadura são a largura da ponteira, a profundidade de trabalho (GODWIN; O'DOGHERTY, 2007) e, em muitos casos, é avaliada a proporção entre a profundidade da ponteira e a sua largura (GODWIN; SPOOR, 1977). Nesse caso, a transferência de peso da semeadora para a haste não apresenta significância no desempenho do mecanismo sulcador para ângulos de ataque menores que $67,5^\circ$. Isso pode ser observado a partir dos estudos de Godwin;

O'Dogherty (2007), que ao utilizarem ponteiras com ângulo de ataque ao solo menor que $67,5^\circ$, observaram valores negativos de requerimento de forças verticais. Na literatura, é possível observar trabalhos utilizando uma grande faixa de ângulos de ataque (15 a 90°) (AIKINS *et al.*, 2020; BARR *et al.*, 2018; CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006; CHAUDHURI, 2001; GODWIN; O'DOGHERTY, 2007; HETTIARATCHI; REECE, 1967; SOLHJOU; FIELKE; DESBIOLLES, 2012). Entretanto, o melhor desempenho tem sido observado com ângulo entre 15 e 30° , faixa na qual a exigência de tração é menor (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006; GODWIN; O'DOGHERTY, 2007).

2.4.2 Escolha do mecanismo sulcador

A alta demanda de energia das hastes sulcadoras faz com que estas sejam substituídas por discos duplos, visando a otimização da frota. Isso possibilita tração de semeadoras com maior número de linhas utilizando a mesma fonte de potência. Entretanto, existem situações que necessitam maior mobilização de solo, especialmente em profundidade, para correção de problemas pontuais, como a compactação subsuperficial e o gradiente de nutrientes no perfil do solo.

O manejo de áreas em sistemas integrados de produção agropecuária como a integração lavoura-pecuária com alta carga animal e/ou o tráfego de máquinas desordenado nas lavouras, especialmente em épocas com alta demanda de trabalho como tratamentos fitossanitários e a colheita, sem o uso de mecanismos de controle de tráfego, gera aumento do grau de compactação do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005). Adicionalmente, a aplicação superficial de fertilizantes, à lanço ou utilizando mecanismos sulcadores com ação em baixas profundidades (< 10 cm), pode gerar um gradiente de nutrientes no perfil de solo (SELLES *et al.*, 1997). Isso ocorre, especialmente, para nutrientes com baixa mobilidade no solo, como o fósforo (P) (NUNES *et al.*, 2014). Em cenários como os supracitados, estudos vêm sugerindo o uso de hastes sulcadoras para romper a camada compactada e depositar fertilizantes em profundidade no solo, em substituição a implementos utilizados em sistemas de cultivos convencional e mínimo, como grade aradora, arados e escarificadores (NUNES *et al.*, 2014, 2015).

Neste sentido, a utilização de hastes sulcadoras com maior profundidade de ação em áreas compactadas tem apresentado resultados positivos em parâmetros físicos do solo, como a redução da densidade do solo (NUNES *et al.*, 2014), da resistência à penetração (VEIGA *et al.*, 2007) e consequente melhoria da estrutura do solo (TORMENA *et al.*, 2008) ou início de um processo de melhoria. Adicionalmente, efeitos na planta são relatados, como aumento do diâmetro do colmo de milho e maior massa seca de raízes em camadas subsuperficiais (0,05–0,17 m) em um Nitossolo (NUNES *et al.*, 2015) e aumento de 11% da produtividade de soja em Argissolo sem irrigação com o uso de hastes sulcadora (CONTE *et al.*, 2009). Entretanto, outros autores não observaram variação da produtividade para soja em Argissolo (HERZOG; LEVIEN; TREIN, 2004) e para o milho em Latossolo (BERTONHA *et al.*, 2015; FURLANI *et al.*, 2013; MÜLLER *et al.*, 2019), indicando que a interferência nos resultados biológicos da planta pode não estar associada apenas à profundidade de ação da haste sulcadora.

Além da profundidade de ação da haste, a magnitude da seção transversal de solo mobilizada indica a forma com que o mecanismo abridor de sulco afeta o solo. A seção transversal do sulco de semeadura vem sendo utilizada como uma ferramenta de avaliação do desempenho dos abridores de sulco (CEPIK; TREIN; LEVIEN, 2005; LEVIEN *et al.*, 2011). Diferentes ângulos de ataque da ponteira afetam as características do sulco de semeadura, como a área de solo mobilizada e a mistura de camadas de solo (SOLHJOU; FIELKE; DESBIOLLES, 2012). Os autores observaram maior mistura de camadas com o menor ângulo de inclinação da ponteira, o que em condições de baixa umidade do solo na parte superior do sulco, aumenta o conteúdo de água no leito de semeadura e favorece a germinação das sementes e emergência da plântula. Por outro lado, com a maior exposição das partículas de solo ao ar, a partir da mobilização, faz aumentar a perda de água nessa região. Além disso, ponteiros das hastes sulcadoras com menor ângulo de ataque apresentam maior eficiência na abertura do sulco, com um maior rompimento do solo (Figura 2) e menor espalhamento de solo para fora do sulco (BARR *et al.*, 2018).

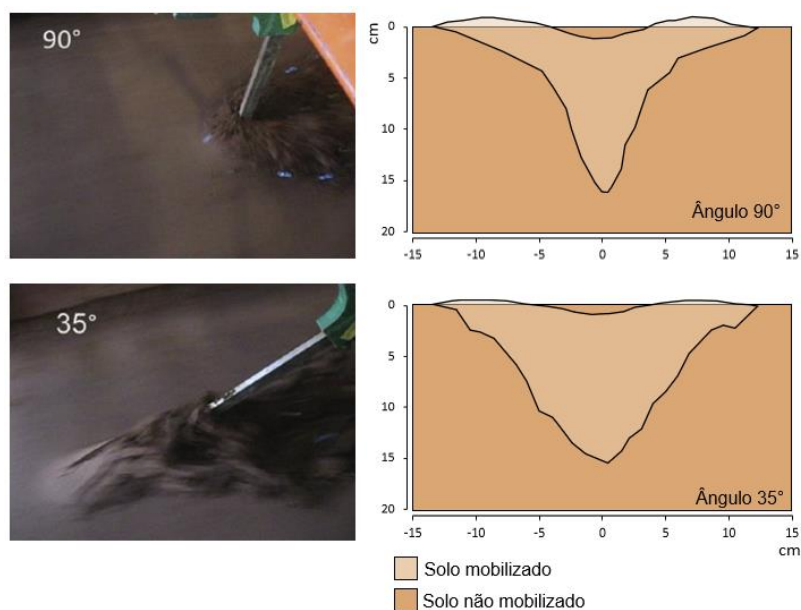


Figura 2. Influência do ângulo de ataque ao solo da ponteira da haste sulcadora na abertura do sulco. Adaptado de Solhjou; Fielke; Desbiolles (2012) e Barr *et al.* (2018).

A relação entre as características do mecanismo sulcador (ângulo de ataque, largura da ponteira, relação profundidade/largura) e a forma de abertura do sulco foi detalhada por meio dos conceitos de falha crescente, falha lateral e profundidade crítica (GODWIN; SPOOR, 1977). A falha crescente é a região onde a ação da haste sulcadora empurra o solo para cima e para frente ao longo de toda a profundidade da falha crescente (Figura 3), gerando o fraturamento, inversão de camadas e a abertura do sulco. Na região da falha lateral, o solo é empurrado para as laterais e para a frente, o que pode resultar em compactação das laterais do sulco. O ponto que separa a falha crescente da falha lateral é conhecido como profundidade crítica, ou seja, a partir dessa profundidade, a eficiência de mobilização do sulcador é menor.

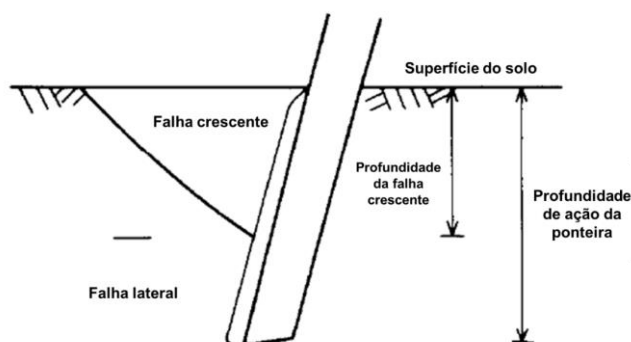


Figura 3. Representação esquemática das regiões de abertura do sulco com ação da haste sulcadora. Adaptado de Godwin; Spoor (1977).

A profundidade de ação da haste, a força de tração e, conseqüentemente, o consumo de combustível são aspectos importantes na tomada de decisão para definir do tipo de mecanismo sulcador a ser utilizado. Embora existam trabalhos e revisões bibliográficas abordando esse assunto (AIKINS *et al.*, 2020; CHAUDHURI, 2001; HASIMU; CHEN, 2014), a maioria limita-se a poucos aspectos dos mecanismos sulcadores, realizando testes em ambiente simulado ou em poucas classes de solo, o que limita a extrapolação de resultados para condições reais. Além disso, o custo entre um ou outro produto muitas vezes é o principal parâmetro analisado para a compra, sem levar em consideração as questões técnicas que envolvem essa decisão. A partir disso, a obtenção de resultados de campo, em condições de solo e com o perfil de máquinas utilizadas no Brasil, é importante para o planejamento e gerenciamento das atividades de semeadura nas propriedades rurais.

3. IMPACT OF TINE RAKE ANGLE ON SOIL MOBILIZATION, ENERGY DEMAND, AND SOYBEAN YIELD UNDER NO-TILLAGE TRAFFICKED IN AN ULTISOL

3.1 Introduction

No-tillage (NT) systems are based on minimum tillage, crop rotation, and permanent soil cover (POSSAMAI *et al.*, 2022), which should be associated with complementary soil conservation practices (FUENTES-LLANILLO *et al.*, 2021). These complementary practices are fundamental for controlling surface runoff, soil erosion and implementing conservation agriculture and the sustainability of production systems. The primary complementary practices that should be associated with NT are terracing, reducing and/or controlling machine traffic, increasing carbon in the soil via plants, and reducing the interval between the harvest and sowing (FUENTES-LLANILLO *et al.*, 2021). These premises are the basis of the processes that reduce the occurrence of erosion, even under high rainfall intensity conditions (OLIVEIRA; WENDLAND; NEARING, 2012), and increase organic carbon stock in the soil and (VELOSO *et al.*, 2018) improve its structure, forming a network of biopores and continuous pores that increase infiltration and water storage in the soil (MONDAL; CHAKRABORTY, 2022).

Nonetheless, in order to make NT feasible, it was necessary to develop specialized seeder-fertilizers to perform a series of functions, as detailed by Murray; Tullberg; Basnet (2006), among which include: (i) uniformly opening the sowing furrows, (ii) mobilizing the soil minimally to provide seed and fertilizer deposition at adequate depth and distance, (iii) providing seed and fertilizer

deposition with accurate and uniform longitudinal distribution, (iv) covering the seeds with sufficient quantities of soil with good seed-soil contact, thereby improving soil moisture transfer to the germination process, (v) avoiding excessive mobilization of the straw on the soil surface, (vi) soil interaction between furrows, and (vii) soil compaction in the furrow. For this system of operations to occur satisfactorily, four elements are crucial in the seeder-fertilizer: the residue-cutting disk, the furrow-opening mechanism, the seed-depositing mechanism, and instruments to close and lightly compact the furrow. The correct operation of these mechanisms of seeder-fertilizer, combined with the operation speed, leads to quality seeding, that directly affect the yield crop (BAKER *et al.*, 2006).

Furrow-opening mechanisms include numerous shapes, geometries, and applications for different soil conditions (AIKINS *et al.*, 2020). Thus, choosing the most suitable fertilizer furrower is paramount, especially in NT, where the formation of a suitable environment for seed germination and plant growth in one operation is required. The main characteristics of sowing drill mechanisms influencing furrow opening are the rake angle, tine width, and critical working depth (GODWIN, 2007). The action of the shanks at depths below the compacted layer generates preferential paths by which the roots explore the soil in sub-surface layers containing water and nutrients previously unexplored (CONTE *et al.*, 2011; DRESCHER *et al.*, 2017; NUNES *et al.*, 2015). Hence, tine furrow openers have an important role in improving soil physical quality (TORMENA *et al.*, 2008), as identified by reductions in bulk density and mechanical resistance to penetration (VEIGA *et al.*, 2007). Nevertheless, using tine furrow openers results in greater draft force, requiring larger and more powerful tractors and increasing fuel consumption (MCLAUGHLIN; CAMPBELL; OWEN, 2019). The cost/benefit of using shanks is still poorly understood, requiring equipment and evaluation strategies that deliver precise and accurate information to support decision-making.

Given this context, developing and validating tools to determine the operational parameters of the mechanized set are increasingly important, including technologies aligned with the digital agriculture concept (PURCELL; NEUBAUER, 2022). Electrical strain gauges in the tine furrow openers are a valuable tool as they enable one to evaluate the draft force required by the tines

and provide satisfactory results in mapping the degree of soil compaction (ASKARI *et al.*, 2016; CONTE *et al.*, 2011). Hence, diagnosing soil compaction tends to be faster, cheaper, and scalable at the operational level, consequently facilitating decision-making processes. Furthermore, still there is a gap on known about the effects that shanks with different tines in seeder-fertilizer machine have on furrow characteristics, crop establishment and productivity, and tractor energy demand under no-tillage system.

Thus, this study hypothesized that using tine furrow openers with lower rake angles in a seeder-fertilizer machine reduces energy demand and soil mobilization under no-tillage and favors to increases soybean yield. The aim was to evaluate the operational performance of tine furrow openers with different rake angles in the seedbed soil physical quality and soybean yield response in compaction levels of an Ultisol under no-tillage.

3.2 Material and methods

3.2.1 Location, background, and experimental design

The experiment was carried out at the Agronomy Experimental Station of Federal University of Rio Grande do Sul, in Eldorado do Sul (latitude 30°05'39.0"S; longitude 51°40'32.2"W; and altitude of 46 m), State of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. The region has a humid subtropical climate (Cfa) according to the Köppen classification, with an average monthly temperature between 13.4°C (July) and 24.3°C (January) and an average annual precipitation of 1631 mm (ALVARES *et al.*, 2013). During the experiment, the meteorological data of precipitation and air temperature were measured daily (Figure 4) by an automated weather station located 500 m from the experimental site. The soil was classified as Ultisol according to Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014) and as Argissolo Vermelho Distrófico Tipico according to Brazilian Soil Classification System (SANTOS *et al.*, 2018), with a sandy clay loam texture (250 g kg⁻¹ of clay, 200 g kg⁻¹ of silt, and 550 g kg⁻¹ of sand).

The experiment was conducted in an area originally cultivated in a native field destined for research on controlled machine traffic and soil compaction, initiated in 2013 and with the reapplication of the treatments in November 2021. Machine traffic and soil chiseling was performed under native grassland field of Pampa Biome.

After the establishment of the experiment in 2013, the area was cultivated under no-tillage using a crop rotation system with soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), and maize (*Zea mayz* Vell.) in the summer, and oats (*Avena strigosa* Schreb), ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.), wheat (*Triticum aestivum* L.), and clover (*Trifolium* spp.) in the winter. In the 2021/2022 season, the summer crop was soybean (cultivar 'Nidera 5909'), maturity group 6.2, and indeterminate cycle.

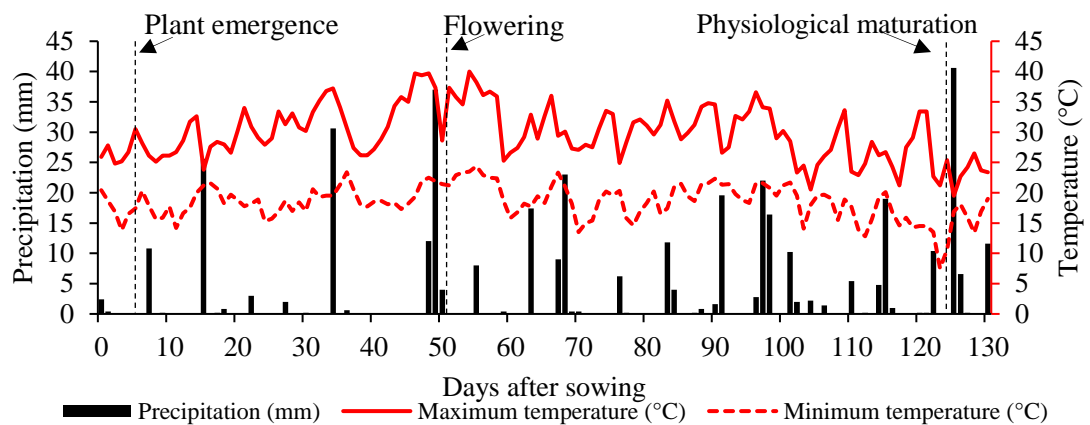


Figure 4. Weather data (rainfall, and minimum, and maximum temperatures) during the soybean season growth of 2021/2022 (days after seeding on November 29, 2021).

The experimental design was a randomized block in a 6x2 factorial scheme (compaction levels x tine rake angle), with 3 blocks, totaling 36 experimental units. Each experimental unit consisted of 20 m² subplots (2.5 m wide and 8 m long). The factor traffic levels in the main plots were performed utilizing soil chiseling or machine traffic intensities applied under native grassland field condition: NT: Continuous no-tillage system implemented under native grassland field without additional traffic; NT₈: No-tillage with soil chiseling 8 years ago; NT_{C2}: No-tillage system compacted with 2 tractor passes in 2013 and 2 traffics in 2021; NT_{C4}: No-tillage system compacted with 4 traffics in 2013 and 4 traffics in 2021; NT_{C8}: No-tillage system compacted with 8 traffics in 2013 and 8 traffics in 2021; NT_{C12}: No-tillage system compacted with 12 traffics in 2013 and no traffic in 2021. The factor of tine rake angle (applied in strips in the subplots) was composed for two tine furrow openers: T_{26°}: original tine of the seeder-fertilizer drill (Vence Tudo®), with a width of 0.021 m, a height of 0.145 m, and soil attack angle of 26°; and T_{18°}: adapted tines with a smaller soil attack angle, with a width of 0.021 m, a height of 0.135 m, and a soil attack angle of 18° (Figure

5), handcrafted by small agricultural machinery component repair companies. This factor of tine type was applied in strips to reduce the effects of seeder-fertilizer variability, tractor forward speed and tractor-seeder operational performed for a similar condition for each experimental block.

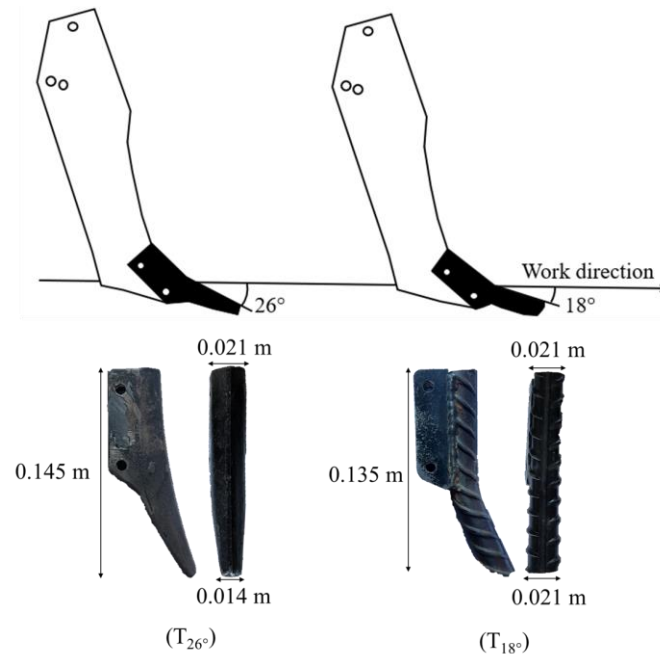


Figure 5. Schematic representation of tine furrow opener with 26° (T_{26°) and 18° (T_{18°) rake angle with soil.

The initial traffic and reapplication of traffic levels occurred with soil water content equivalent to the plastic consistency form (0.17 kg kg^{-1}). We utilized an Valtra tractor (model BM125i) with a total mass of 6.3 Mg, with front tires 14.9-26R1 and rear tires 23.1-30R1, both with an inflation pressure of 124 kPa and 75% ballasting with water in each of the wheels. The theoretical mean ground pressure for the contact area calculated as (O’SULLIVAN; HENSHALL; DICKSON, 1999) were 144 kPa in the front wheel, and 149 kPa in the rear wheel.

3.2.2 Sowing and crop management

In October 2021, winter crop (black oat) desiccation was performed with glyphosate herbicide (dose of $1250 \text{ g e.a. ha}^{-1}$). On November 29, the soybean cultivar ‘Nidera 5909’ was sown using a SA11500 trailed seeder-fertilizer, with five lines spaced at 0.5 m, a 16" straw cutting disk, shank with tines opener furrows and place fertilizer, double offset disk (formed by two flat disks, one with 13" and the other with 14") for seed placement, depth-limiting wheels, compactor wheels, and horizontal seed metering disk with 90 holes. The seeder

was regulated to deposit 17 seeds m^{-1} (84 % of germination potential and 98 % of purity with 82 % of total germination) to obtain a final population of 28 plants m^{-2} at 0.05 m depth and 350 kg ha^{-1} of fertilizer (NPK 04-20-10) at depths of 0.12 m.

The seeder-fertilizer was coupled to the drawbar of a John Deere tractor (model 5600), 4x2, with front auxiliary traction, 55 kW engine power, a total mass of 4.5 Mg, front tires 12.4-24 R1, and rear 18.4-30 R1, with an inflation pressure of 95 and 110 kPa, respectively. The engine working rotation during the seeding operation was 1950 rpm in gear 2B, which provided a tractor forward speed of 4 km h^{-1} .

Soybean plant emergence was evaluated 14 days after sowing, and the plant stand 42 days after sowing; both were conducted by counting the number of plants along 4 linear meters in each repetition. Pest, disease, and weed management followed the technical recommendations for soybean cultivation. The grain harvest was performed excluding the borders of the subplots using the three central lines along 2 m (total area of 3 m^2).

3.2.3 Data acquisition instrumentation

Draft force data were collected from the driller-seeder shanks using electric strain gauges using the acquisition system initially proposed by Cepik (2006). This system was revised and adapted, with four strain gauges per stem, a data logger for data storage, a global positioning system, wiring for communication between the strain gauges and the data logger, data transmission via Bluetooth, and an interface to a digital data processing system in Microsoft Excel[®].

The same telemetry system was used to read and store fuel consumption data, which was measured with a set of liquid flow meters (model LSF41, Oval Corporation). One flow meter was installed at the inlet of the tractor fuel filter, while the other was installed at the fuel return to the tank. The difference between the fuel that passed through the filter and that returned to the tank was considered as the hourly fuel consumption (F_c), from which the specific fuel consumption (S_{fc}) (Equation 1) and the operational fuel consumption (O_{fc}) (Equation 2) were calculated.

$$S_{fc} = \frac{(f_c * \rho_f)}{D_p} \quad (1)$$

where, S_{fc} - specific fuel consumption (g kW h⁻¹); F_c - hourly fuel consumption (L h⁻¹); ρ_f - fuel density, 880 g L⁻¹; D_p - drawbar power (kW).

$$O_{fc} = \frac{F_c}{E_{fc}} \quad (2)$$

where, O_{fc} - operational fuel consumption (L ha⁻¹); F_c - hourly fuel consumption (L h⁻¹); E_{fc} - effective field capacity (0.8 ha h⁻¹).

The tractor rear wheel-slip in the seeding operation (Equation 3) was obtained through the relationship of actual distance traveled (d_r) and the theoretical distance (d_t). The seeding operation was developed without activating the auxiliary front-wheel drive.

$$ws = \left(\frac{d_r - d_t}{d_t} \right) * 100 \quad (3)$$

where, ws is the wheel-slip (%); d_r is the field distance on the ground (m) by tractor for seeder-fertilizer down in working position; d_t is the theoretical distance (m) of rear wheel of tractor with seeder-fertilizer up.

3.2.4 Soil physical attributes and sowing furrow characteristics

The soil was sampled after the reapplication of traffic levels in November 2021, before soybean sowing. Undisturbed soil core (internal diameter of 0.05 m, height of 0.04 m, and volume of 78.54×10^{-6} m³) were collected in the main plots (compaction level), in three soil layers (0–0.05, 0.05–0.10 and 0.10–0.15 m), totalizing 54 samples (6 compaction levels x 3 layers x 3 blocks). Soil bulk density was determined by the relation dry mass and volume (Mg m⁻³) (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Macroporosity (pores > 50 μ m), and microporosity (pores \leq 50 μ m) were determined using a suction table at a matric potential of -6 kPa.

Soil penetration resistance was determined, at the same time that bulk density, on field condition using a Falker® penetrometer (0.40 m long tapered rod with a 10.6 mm diameter steel cone and 30° angle). For this, in the center of each plot, a transect of 1.20 m length was performed with 12 measuring points 0.10 m apart each, totaling 216 evaluation points (6 traffic level x 12 sampling points x 3 blocks). Throughout the test, gravimetric soil water content, in the 0 to 0.15 m depth, was 0.14 kg kg⁻¹, corresponding to moisture in the friable soil consistency.

The geometry of the furrow and soil groove disturbance were measured immediately after seed drilling by carefully removing the disturbed soil from seedbed manually. The geometry of the furrow was measured with a rod profilometer according to the method of Conte *et al.* (2011). For this, in each subplot, the disturbed soil from grooves was removed of one meter to performed three profilometer measurements, totaling 108 evaluations (6 compaction levels x 2 tines x 3 blocks x 3 pseudo-repetition). The profilometer with 0.4 m height and 0.3 m wide, which is composed of 29 sticks separated 0.01 m, which can be dislocated up to 0.3 m (CONTE *et al.*, 2011). The profilometer was positioned in transverse way in the furrow to release the sticks and describe the groove geometry. The positioning of the sticks on the soil groove was transcript to paper sheets. The average (three measurements per plot) of highest vertical distance between groove bottom and soil surface correspond to its greatest depth (furrow depth). The vertical distance for each point (stick) copied from the groove bottom to the soil surface were measured in the laboratory and using a spreadsheet (Microsoft Excel®). The furrow cross-section area is the results of depth values integration with groove width by the trapezoidal rule using the Excel® software. The disturbance index was calculated as suggested by Conte *et al.* (2011), using the relation between the furrow cross-section area and the furrow depth.

The soil penetration resistance in the furrow seedbed was determined by measurements in the field with a manual digital dynamometer (Lutron brand, model FG-5020) (Figure 6), equipped with a 0.07 m long conical tip rod, semi-angle of 30° and basal diameter of 4 mm, with an automatic frequency of one-measurement per second. For this, in each subplot, the disturbed soil from grooves was removed of one meter to performed nine (9) evaluation point of penetration resistance in furrow bottom and nine (9) measurements in the wall of furrow (Figure 6). In each point, the rod was inserted at a depth corresponding to 50% of the furrow depth (Table 3), the approximate location of seed deposition, perpendicularly to the two locals of evaluation: wall and bottom of the furrow (Figure 6b and 6c), with an average speed of 3.33 mm s⁻¹ up to 0.07 m depth, producing three readings per centimeter, totaling 21 reads per point (7 layers x 3 readings per layer). The force data (kgf) were transferred to a computer using an RS-232 output, where they were stored. The mean force value obtained for each centimeter of depth was transformed into pressure (MPa) using Equation 4

(FIGUEIREDO *et al.*, 2011). Thus, for each subplot, 189 readings of soil penetration resistance were obtained, totaling 13,608 readings (21 reads per point, 9 points per subplot, 2 local, 2 times, 6 traffic level, 3 blocks).

$$SPR_F = \frac{Fg}{A10^6} \quad (4)$$

where, SPR_F is the soil penetration resistance into the furrow (MPa); F the measured force (kgf); g the acceleration of gravity ($m\ s^{-2}$) and A the area of the base of the cone (m^2).

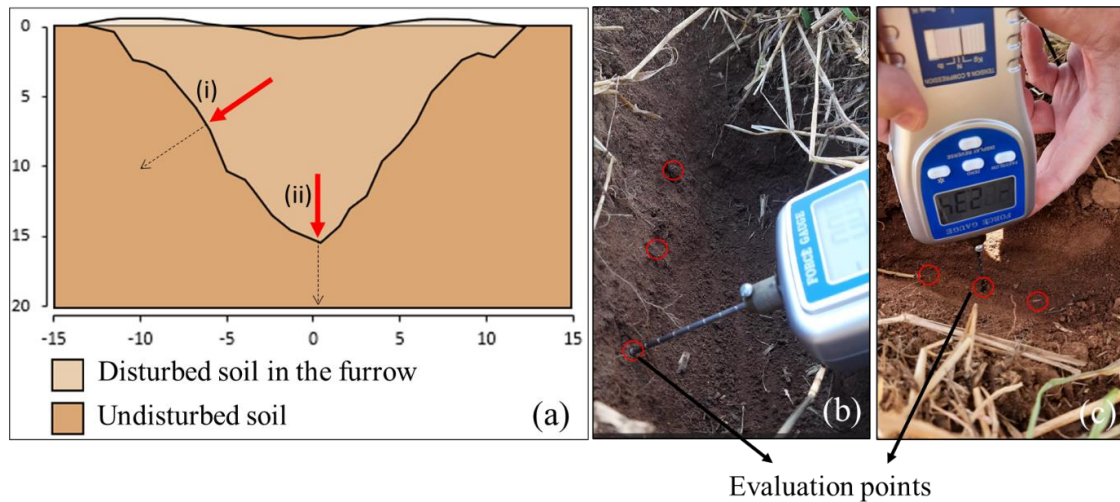


Figure 6. Soil penetration resistance measurement at two positions in the seedbed (a), on the wall (i) (b), and at the bottom (ii) (c). The arrows indicate the direction of penetration test. The circles indicate the evaluation points.

3.2.5 Statistical analysis

Data were subjected to normality analysis using the Shapiro-Wilk test ($p < 0.05$) and homoscedasticity analysis using Bartlett's test ($p < 0.05$). If the assumptions for parametric statistical tests were not met, the data were transformed using the square root method. With the assumptions for parametric analysis met, analysis of variance (ANOVA) was performed, testing the traffic level and the types of furrower stem tips. When ANOVA was significant ($p < 0.05$), the means were compared by Scott Knott's test ($p < 0.05$ and $p < 0.10$). For the regression analyses between draft force, soil penetration resistance, and bulk density, the data were subjected to ANOVA at the 5% significance level. Data analysis was performed with the statistical package ExpDes.pt (version 1.2.2) (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2021) and RStudio interface (version 1.4.1717) (R CORE TEAM, 2012).

3.3 Results and discussion

3.3.1 Physical soil properties

The results point to significant increases in bulk density and soil penetration resistance, while macropores were reduced in the 0–0.15 m layer for the treatments that experienced traffic (Table 1). Soil bulk density and soil penetration resistance were increased due to tractor traffic, and already with the lowest traffic level (NT_{C2}) there was compaction until 0.15 m depth. Which indicate that soil compaction can be happen after the first passes of tractor, which favors to soil structure damage. These data corroborate Bakker; Davis (1995) and Moraes *et al.*, (2013), who observed that the first pass is responsible for the largest proportion of total compaction soil can suffer under agricultural conditions. As expected, tractor traffic reduced the soil macropores, with decreases of 70% of macroporosity for NT_{C2}, and 81% for NT_{C4} and NT_{C8} comparing to NT (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). It is well known in the literature that the soil compaction processes reduce the large pores of soil, and in most cases not affect the volume of micropores (LIMA *et al.*, 2022). Our findings show differences for micropores in the superficial layer (0 – 0.05 m), with increased trafficked treatments (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

The NT_{C12} treatment showed no differences in bulk density, soil penetration resistance and volume of macropores and micropores in the layers from 0.05 m to 0.15 m compared to the NT, indicating recovery of soil structures. The effects of soil compaction imposed by 12 tractor-traffic, after 8 years, are restricted to the top soil layer (0–0.05 m). Bulk density at the layers up to 0.15 m of the NT_{C12} (from 1.45 to 1.57 Mg m⁻³) and soil penetration resistance (< 2.0 MPa) were lower than those observed in all treatments with additional traffic in 2021, while macropores volume is higher (from 0.14 to 0.17 m³ m⁻³). The persistence time of soil compaction effects varies depending on soil type, use and management, and climatic conditions (KELLER *et al.*, 2019). Thus, under the climatic and management conditions to which this soil has been subjected, various factors may have catalyzed the process of reorganization of the physical structure of the soil, including growing two crops per year, crop rotation, constant biological activity, high rainfall (>1600 mm year⁻¹), and wetting and drying cycles (BONETTI *et al.*, 2017; MOREIRA *et al.*, 2014).

Table 1. Soil physical attributes in the topsoil layers of an Ultisol cultivated under no-tillage with different traffic levels.

Soil layer (m)	Traffic levels					
	NT _{C8}	NT _{C4}	NT _{C2}	NT _{C12}	NT ₈	NT
	Bulk density (Mg m ⁻³)					
0–0.05	1.67 a*	1.51 b	1.60 a	1.45 c	1.39 c	1.29 d
0.05–0.10	1.72 a	1.70 a	1.69 a	1.54 b	1.55 b	1.50 b
0.10–0.15	1.74 a	1.68 a	1.66 a	1.57 b	1.67 a	1.56 b
	Soil penetration resistance (MPa)					
0–0.05	0.91 ns	0.78	0.75	0.59	0.60	0.65
0.05–0.10	2.17 a	1.86 a	1.99 a	1.46 b	1.54 b	1.40 b
0.10–0.15	2.34 a	2.21 a	2.28 a	1.98 b	1.90 b	1.93 b
	Macropores (m ³ m ⁻³)					
0–0.05	0.04 c	0.04 c	0.07 c	0.16 b	0.16 b	0.21 a
0.05–0.10	0.04 b	0.06 b	0.08 b	0.14 a	0.15 a	0.16 a
0.10–0.15	0.05 b	0.08 b	0.11 b	0.17 a	0.11 a	0.11 a
	Micropores (m ³ m ⁻³)					
0–0.05	0.32 b	0.36 a	0.33 b	0.29 c	0.28 c	0.28 c
0.05–0.10	0.30 ns	0.30	0.25	0.27	0.25	0.27
0.10–0.15	0.28 ns	0.26	0.25	0.25	0.26	0.26

*Means followed by different letters in the row differ significantly from each other by the Scott Knott test ($p < 0.05$). NT: no-tillage continuous; NT₈: no-tillage after eight years of soil chiseling. NT_{C2}: no-tillage with two passes of tractor in 2013 plus two passes in 2021. NT_{C4}: no-tillage with four passes of tractor in 2013 plus four passes in 2021; NT_{C8} no-tillage with eight passes of tractor in 2013 plus eight passes in 2021; NT_{C12}: no-tillage with twelve passes of tractor in 2013.

3.3.2 Draft requirements

The different degrees of soil compaction identified by bulk density and soil penetration resistance was also observed with the increase of the draft force required to pull each tine furrow opener through the soil (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). We observed the formation of two distinct groups in draft force required: i) soil with traffic in 2021 (NT_{C8}, NT_{C4}, and NT_{C2}), which varied from 1310 to 1393 N opener⁻¹, and ii) soil without traffic in 2021 (NT_{C12}, NT₈, and NT), which presented values between 1046 and 1107 N opener⁻¹. Thus, there was differences of draft force of treatments with traffic at 2021 (NT_{C8}, NT_{C4}, and NT_{C2}) in relation to that treatments without traffic in 2021 (i.e., NT_{C12}, NT₈, and NT). Kamimura *et al.* (2009) found draft force required 1395 N opener⁻¹ in a similar depth working of an Ultisol.

Differences were also identified between the two tines furrow opener (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Tine furrow opener with 26° of rake angle (T_{26°}) required greater draft force compared to lowest rake angle of tine furrow opener (T_{18°}). In general, use of tine with highest rake angle favors to opener the groove deeper (Table 3). This is mainly due to the tine characteristics

impacts directly on total draft force required (AIKINS *et al.*, 2020; CONTE *et al.*, 2011; GODWIN; O'DOGHERTY, 2007; TROGER *et al.*, 2012). Chaudhuri (2001) indicated that higher soil rake angles increase the draft force on the tine furrow opener, corroborating our findings under no-tillage, in which T_{26°} presented a soil rake angle of 26° whereas T_{18°} had 18° (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). In this context, in field situations, the tine sizes may change seeding units (rows of the seeding machine) for the same machine power, which directly affects the operational performance of the mechanized set. For no-tillage conditions, the ability of furrow openers to bring moist soil up to the seed zone, soil moisture availability and evaporation rate reduction are more important than deepest groove (CHAUDHURI, 2001).

Table 2. Draft force, specific fuel consumption, operational fuel consumption, and wheel-slip under no-tillage with traffic levels and tine furrow openers.

Traffic level	Opener draft force (N opener ⁻¹)*	Specific fuel consumption (g kW h ⁻¹)*	Operational fuel consumption (L ha ⁻¹)**	Wheel slippage (%)**
NT _{C8}	1393 a	81 ns	6.4 ns	5.5 b
NT _{C4}	1337 a	80	6.7	7.3 a
NT _{C2}	1310 a	84	6.6	7.2 a
NT _{C12}	1077 b	79	6.2	6.6 a
NT ₈	1046 b	84	6.5	7.4 a
NT	1107 b	81	6.3	7.8 a
Tine type				
T _{26°}	1415 a	85 a	6.7 a	7.1 ns
T _{18°}	1009 b	79 b	6.1 b	7.0

Averages followed by different letters in the column differ by the Scott Knott test, where * $p < 0.05$, and ** $p < 0.10$. NT: no-tillage continuous; NT₈: no-tillage after eight years of soil chiseling. NT_{C2}: no-tillage with two passes of tractor in 2013 plus two passes in 2021. NT_{C4}: no-tillage with four passes of tractor in 2013 plus four passes in 2021; NT_{C8} no-tillage with eight passes of tractor in 2013 plus eight passes in 2021; NT_{C12}: no-tillage with twelve passes of tractor in 2013. T_{26°} is the tine furrow opener with 26° rake angle. T_{18°} is the tine furrow opener with 18° rake angle.

It was possible to identify the soil compactness state as results of variations in the draft force measured on the tine furrow opener (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). These results indicate that using electric extensometers constitutes an alternative for diagnosing soil compaction, making the process less laborious and possible to be used on a larger scale. Nevertheless, the need for both the sensor calibration after their installation in the tine furrow openers and measurement of soil water content during the test.

Regression analyses were performed between draft force and soil penetration resistance and bulk density, with significance for both variables and

tine types (**Erro! Fonte de referência não encontrada.A** and 7B). For the regression of draft force and bulk density were high for all equation fitting for both T_{18° and T_{26° , with determination coefficient of 0.80 and 0.85, respectively. Sánchez-Girón *et al.* (2005) tested different soil management mechanisms and observed an increase in draft force at higher bulk densities and greater draft force to reach greater maximum furrow depth. This corroborates our findings, in which the treatments submitted to traffic (i.e., highest bulk density) presented a shallow groove and a greater draft force required in relation to those soil without recent traffic.

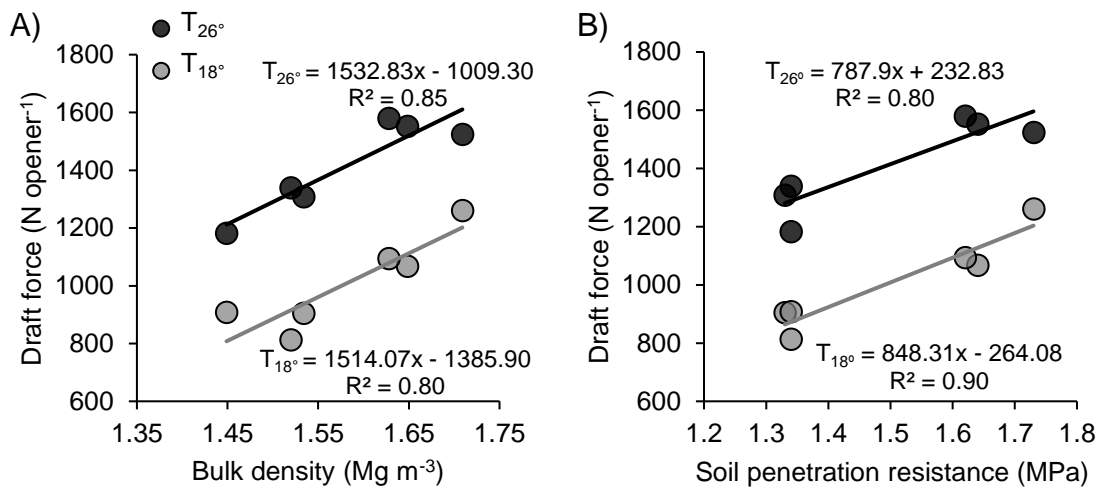


Figure 7. Impact of the type of furrower stem tip on the relationship between the draft force with bulk density (A) and soil penetration resistance (B) in the 0–0.15 m soil layer. T_{26° is the tine furrow opener with 26° rake angle. T_{18° is the tine furrow opener with 18° rake angle.

For the regression between draft force and soil penetration resistance, the determination coefficient (R^2) was 0.80 and 0.90 for T_{26° and T_{18° , respectively (**Erro! Fonte de referência não encontrada.B**). These regressions were better fitted to the data than that presented by Kamimura *et al.* (2009), which reported that under no-tillage with and without machine traffic adjustment coefficient of 0.60.

3.3.3 Fuel consumption and slippage

Specific fuel consumption (S_{fc}) was similar ($p > 0.05$) between traffic levels (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), with values ranging between 79 and 84 g kW h⁻¹. Nevertheless, differences in S_{fc} were identified between the tines, with consumption higher when T_{26° was used (85 g kW h⁻¹), while T_{18° showed specific fuel consumption of 79 g kW h⁻¹ (**Erro! Fonte de**

referência não encontrada.) This is related to the higher draft force required by T_{26° compared to T_{18° , resulting in a fuel consumption increment of 10.4%. Grotta *et al.* (2009) identified a specific fuel consumption of 132 g kW h^{-1} when working with tine furrow openers at 0.11 m depth in soil with 510 g kg^{-1} of clay. This denotes the effect of soil texture on draft force, as reported by Collins; Fowler (1996), who observed higher draft force as clay content increased.

Nevertheless, operational fuel consumption (O_{fc}) showed no significant differences as a function of traffic level, although it was possible to observe significance for the types of tines (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). The operational fuel consumption was lower for T_{18° (6.1 L ha^{-1}), while T_{26° showed a consumption of 6.7 L ha^{-1} , corresponding to a 10% increase in operational fuel consumption. The draft force for each tine furrow opener for an Ultisol (localized in Canada) was increased linearly ($8.25 \text{ N per mm depth}$) with of depth of seeding, resulting in increasing in operational fuel consumption (MCLAUGHLIN; CAMPBELL; OWEN, 2019).

The wheel slippage was impacted due to traffic level, with the lowest values under higher soil compaction degree (NT_{C8}) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). No-tillage favor to increase the strengthening of soil over the time and produce firm soil that increase the soil load support capacity (MORAES *et al.*, 2019) and decrease the motion resistance (BOTTA *et al.*, 2012) and wheel slip (BATTIATO; DISERENS, 2017) due to greater soil resistance at the soil-tire interface, reducing the loss of energy and generating greater draft force (JENANE; BASHFORD, 2000). The type of tine furrow opener not influenced to the tractor wheel-slippage (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Slippage is a form of dissipation of the excessive force generated by the engine and occurs when there is excess tractor power combined with low traction potential. The slip should be below 10% in non-tilled soils so that there is no loss of traction efficiency and excessive wear of the tires (ASAE, 1989). Thus, the data from our study are below the acceptable limit, even without front-wheel assist drive. In addition, the absence of differences for wheel-slip under most of treatments (NT, NT_8 , NT_{C2} , NT_{C4} , and NT_{C12}) would be due to black oat straw (8 Mg ha^{-1}) at soil surface under no-tillage treatments, which reduced the tire-soil contact favors to increase the wheel slippage (CEPIK, 2006).

3.3.4 Soil groove mobilization

The treatments without traffic in 2021 (NT, NT₈ and NT_{C12}) shown largest furrow cross-section, not differing among themselves but differing significantly for the trafficked treatments (NT_{C2}, NT_{C4}, and NT_{C8}) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). This indicates that higher traffic level, the lower soil groove mobilization by tine furrow openers. NT_{C8} was the traffic level with the smallest furrow cross-section, followed by NT_{C4} and NT_{C2}, pointing to a reduction in the penetration capacity of tine thought in the soil with increasing compaction status. This is due to the increase of the draft force required by the tine, limiting the maximum depth of the furrow and thereby corroborating the findings of Sánchez-Girón *et al.* (2005), who studied the effects of soil compaction caused by seeder-fertilizers. The largest furrow cross-section was observed for T_{26°} (126 cm²), which is 19% bigger than T_{18°}, which mobilized 106 cm² (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). The tine's geometric characteristics (Figure 5) defined the furrow opening performance. Wider tines and soil rake angles and greater working depth mobilize a greater area of soil in the furrow (GODWIN; O'DOGHERTY, 2007), corroborating our findings.

Table 3. Furrow cross-section, maximum furrow depth, and disturbance index under no-tillage with traffic level and tine furrow openers.

Traffic level	Furrow cross-section (cm ²)*	Furrow depth (cm)*	Disturbance index
NT _{C8}	77 d	8.6 b	8.9 b
NT _{C4}	88 c	9.5 b	9.2 b
NT _{C2}	100 b	10.0 b	9.9 b
NT _{C12}	140 a	11.2 a	11.6 a
NT ₈	141 a	11.4 a	12.2 a
NT	150 a	12.0 a	12.3 a
Tine type			
T _{26°}	126 a	11.4 a	10.8 ns
T _{18°}	106 b	9.6 b	10.4

Averages followed by different letters in the column differ by the Scott Knott test, where * $p < 0.05$, and ** $p < 0.10$. NT: no-tillage continuous; NT₈: no-tillage after eight years of soil chiseling. NT_{C2}: no-tillage with two passes of tractor in 2013 plus two passes in 2021. NT_{C4}: no-tillage with four passes of tractor in 2013 plus four passes in 2021; NT_{C8} no-tillage with eight passes of tractor in 2013 plus eight passes in 2021; NT_{C12}: no-tillage with twelve passes of tractor in 2013. T_{26°} is the tine furrow opener with 26° rake angle. T_{18°} is the tine furrow opener with 18° rake angle.

The mean furrow depth and the disturbance index were different for the trafficked and non-trafficked groups but similar ($p > 0.05$) within the groups (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). This indicates that the increment in soil penetration resistance caused by tractor traffic impacts on critical depth of

tine furrow openers. Sánchez-Girón *et al.* (2005) highlighted that the increase in bulk density leads to greater demand for vertical force on the tine furrow opener, and consequently favor to reduction in the furrow depth. The disturbance index is an indicator for measure the efficiency of the disturbance, and as it becomes smaller the efficiency of soil mobilization decreases. The groove mobilization has importance for soil physical (i.e., soil compaction mitigation) and chemical (i.e., nutrient distribution) conditions on seedbed to plant establishment (SELLES *et al.*, 1997). In this context, in soils with a compaction diagnosis, it is preferable to act in depths slightly below the compacted layer, aiming at its disruption and creating adequate conditions to develop the root system in the soil profile (NUNES *et al.*, 2015). The authors also reported the importance of deep fertilizer (bellow 0.10 m depth) with phosphorus (P), especially when the soil P status are below the critical P level, because of the low mobility of this nutrient in the soil. Nevertheless, greater soil groove mobilization may not be required in soils under no-tillage with good physical conditions, without a compaction diagnosis limiting root development, and without expressing a nutrient gradient in the profile. Thus, tine furrow opener with lowest rake angle (18°) shown the best soil groove mobilization to keep soil structure under no-tillage system.

3.3.5 Soil strength in the seedbed

The soil penetration resistance in the furrow wall was significant (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), varying from 1.93 MPa, on NT₈, to 3.23 MPa on NT_{C8}, an increase of 67%. The highest values were found to NT_{C8} and NT_{C4} with significant difference for the other treatments.

Table 4. Soil penetration resistance in the furrow wall (SPR_w) and in the furrow bottom (SPR_B) as a function of compaction levels and tine types.

Traffic level	Furrow bottom		Furrow wall	
	SPR _B (MPa)	<i>U</i> (kg kg ⁻¹)	SPR _w (MPa)	<i>U</i> (kg kg ⁻¹)
NT _{C8}	2.82 ns	0.14 ns	3.23 a	0.15 ns
NT _{C4}	2.49	0.14	3.20 a	0.15
NT _{C2}	2.06	0.14	2.49 b	0.15
NT _{C12}	2.19	0.15	2.05 b	0.15
NT ₈	2.16	0.15	1.93 b	0.15
NT	2.37	0.15	1.94 b	0.15
Tine Type				
P _{26°}	2.43 ns	0.15 ns	2.32 ns	0.15 ns
P _{18°}	2.28	0.14	2.57	0.15

Averages followed by different letters in the column differ by the Scott Knott test ($p < 0.05$). SPR_B – soil penetration resistance in furrow bottom; SPR_W – soil penetration resistance in furrow wall; U – gravimetric water content; NT: no-tillage continuous; NT_8 : no-tillage after eight years of soil chiseling. NT_{C2} : no-tillage with two passes of tractor in 2013 plus two passes in 2021. NT_{C4} : no-tillage with four passes of tractor in 2013 plus four passes in 2021; NT_{C8} no-tillage with eight passes of tractor in 2013 plus eight passes in 2021; NT_{C12} : no-tillage with twelve passes of tractor in 2013. T_{26° is the tine furrow opener with 26° rake angle. T_{18° is the tine furrow opener with 18° rake angle.

These results show the soil penetration resistance experienced by roots when they are beginning to grow out of the groove, where the soil was not perturbed. Root growth outside the furrow increases the portion of soil explored by plants, increasing access to water and nutrients, which helps in the supply and growth of plants, even in cases of water stress. The differences in soil penetration resistance were not significant when evaluated in the furrow bottom, and for tine type (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

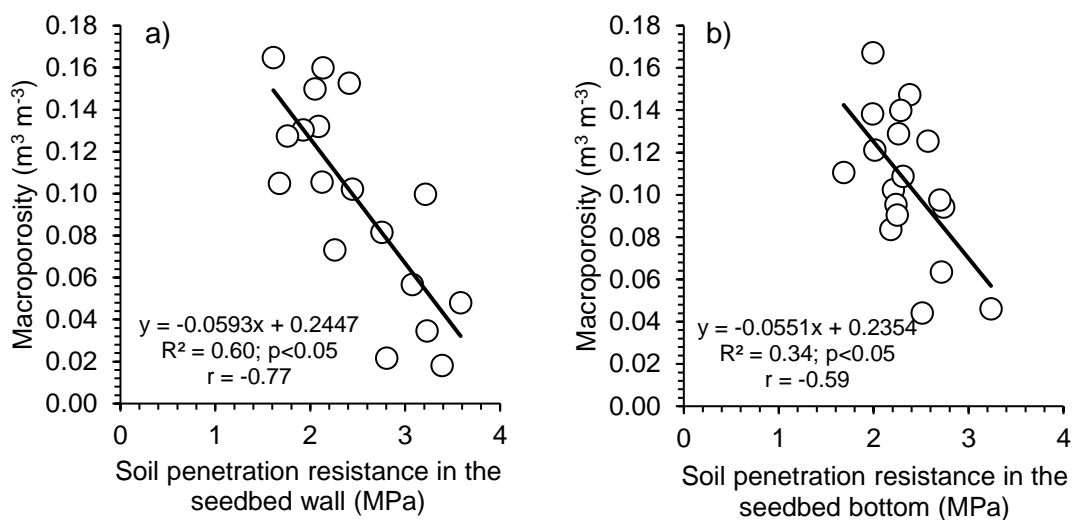


Figure 8. Relationship of macroporosity and soil penetration resistance in the wall (0.05 – 0.10 m layer) (a) and bottom (0.10 – 0.15 m layer) of seedbed of an Ultisol under no-tillage.

Regression analysis were performed between macropores and soil penetration resistance in the wall and bottom of furrow, with significance for both (Figure 8a and 8b). The regression of macropores at 0.05–0.10 m layer and soil penetration resistance in furrow wall (Figure 8a) show determination coefficient of 0.60, while between macropores at 0.10–0.15 m layer and the soil penetration resistance in furrow bottom the determination coefficient was 0.35 (Figure 8b). Additionally, correlation analysis were fitted, showing the reduction of macropores as increase soil penetration resistance in furrow wall (Figure 8a) and in furrow bottom (Figure 8b), with correlation coefficient of -0.77 and -0.59, respectively.

3.3.6 Plant parameters and its relation to seedbed physical quality

The treatments did not influence the emergence of soybean plants at 14th days after sowing (Table 5). This indicates that regardless of tine furrow openers and soil compaction level the germination and emergence of seeds were satisfactory. Nevertheless, the treatments influenced the plant stand, with the additional traffic (NT_{C2}, NT_{C4}, and NT_{C8}) favors a lower plant stand than that treatments without traffic in 2021 (NT_{C12}, NT₈, and NT). Furthermore, the treatments without traffic in 2021 presented the plant stand were closer to the projected plant stand (28 plants m⁻²). Thus, soil compaction by tractor traffic negatively affected the plant stand. Similarly, tine furrow opener with 18° rake angle (T_{18°}) showed a lower plant stand than highest rake angle (26°) (Table 5). This is related to the lower mobilization of soil in areas with traffic and T_{18°}, which may have resulted in a lower depth of seed deposition in the furrow and seedling death due to low rainfall in the first 30 days of the crop cycle (Figure 4).

Table 5. Soybean crop development (emergence, plant stand) and grain yield under traffic levels and tines furrow openers.

Traffic level	Plant emergence ¹ (plants m ⁻²)**	Plant stand ² (plants m ⁻²)*	Soybean yield (kg ha ⁻¹)**
NT _{C8}	22.5 ns	22.2 b	3,540 ns
NT _{C4}	21.8	21.0 b	3,664
NT _{C2}	22.2	21.7 b	3,181
NT _{C12}	22.5	25.8 a	3,434
NT ₈	24.5	25.2 a	3,421
NT	24.3	25.8 a	3,738
CV (%)	19.5	12.1	16.1
Tine type			
T _{26°}	22.2 ns	24.1 a	3,417 b
T _{18°}	23.7	23.1 b	3,616 a
CV (%)	21.4	1.8	4.2

Averages followed by different letters in the column do not differ by the Scott Knott test, being * $p < 0.05$, and ** $p < 0.10$, and ns, not significant. CV (%) - coefficient of variation. ¹Emergence at 14 days after sowing. ²Final stand at 42 days after sowing. NT: no-tillage continuous; NT₈: no-tillage after eight years of soil chiseling. NT_{C2}: no-tillage with two passes of tractor in 2013 plus two passes in 2021. NT_{C4}: no-tillage with four passes of tractor in 2013 plus four passes in 2021; NT_{C8} no-tillage with eight passes of tractor in 2013 plus eight passes in 2021; NT_{C12}: no-tillage with twelve passes of tractor in 2013, and no traffic in 2021. T_{26°} is the tine furrow opener with 26° rake angle. T_{18°} is the tine furrow opener with 18° rake angle.

Soybean crop yield was not altered as a function of machine traffic level (Table 5). Although soil compaction is a potential problem, its effects are usually not pronounced in years with regular rainfall, especially during the plant

reproductive period, as observed throughout the 2021/2022 crop season (Figure 4). Nevertheless, in times of water deficit, water storage may be, in many cases, increased in medium-compacted soils since the compaction process transforms larger pores into smaller ones, which may improve water retention and availability for plants (MORAES *et al.*, 2018). Thus, although compaction can limit root growth at depth since water availability in the superficial soil layers was not limiting, yield losses were not noticed in the present study. This reinforces the need to consider the interaction between soil physical attributes and climatic conditions for analysis of the effects of soil compaction on crop production (LIU *et al.*, 2022; MULAZZANI *et al.*, 2022).

Tine furrow openers (Table 5) affected soybean grain yield, but there were no differences for compaction levels. The productivity was higher when T_{18°} was used, with 3,616 kg ha⁻¹, while T_{26°} provided a productivity of 3,417 kg ha⁻¹, which corresponds to increases of 5.8% in yield with lowest rake angle of tine. This result may be related to soil groove mobilization, which impact on soil structure and water available for plant growth. The first 30 days after sowing had low rainfall, with only 45.6 mm, thus, the lowest soil groove mobilization keep the soil structure under no-tillage. In addition, the low groove mobilization with tine T_{18°} (18° rake angle) enabled the roots to growth thorough the soil with preserved structure, containing pore space, nutrients, and water. The greatest soil groove mobilization under T_{26°} (26° rake angle) favors high soil aeration, resulting in water losses from seedbed, especially by drainage and evaporation (BARR *et al.*, 2018; SOLHJOU; FIELKE; DESBIOLLES, 2012a).

Soil penetration resistance in two positions of seedbed (bottom and wall) related to plant parameters (Figure 9) show that values of up to ~3.2 MPa in that Ultisol was not limiting for plant emergence, plant establishment and soybean yield. Only plant stand related negatively ($p=0.0006$) with soil penetration resistance in the seedbed wall (Figure 9d), and all others regression of soil penetration resistance and plant parameters were not significant at 5% significance level. This indicate the values of soil penetration resistance up to 2.8 MPa in the bottom seedbed and 3.2 MPa in the wall of seedbed were adequate for plant growing and production. Guedes Filho *et al.* (2013) studding the soil physical quality of seedbed of a Typic Argiustolls, in the central Great Plains, USA, cultivated under no-tillage, identify that soil layer at 0-0.05 cm presented a

better physical quality for seed germination than that 0.05-0.10 m depth. In addition, the main limiting factor was soil penetration resistance at 0-0.05 m and the air-filled porosity at 0.05-0.10 m depth (GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013). Thus, the seedbed physical quality of an Oxisol was improved with cover crop (forage radish) cultivated under no-tillage shown improvement of soil aggregate stability (GUEDES FILHO *et al.*, 2013).

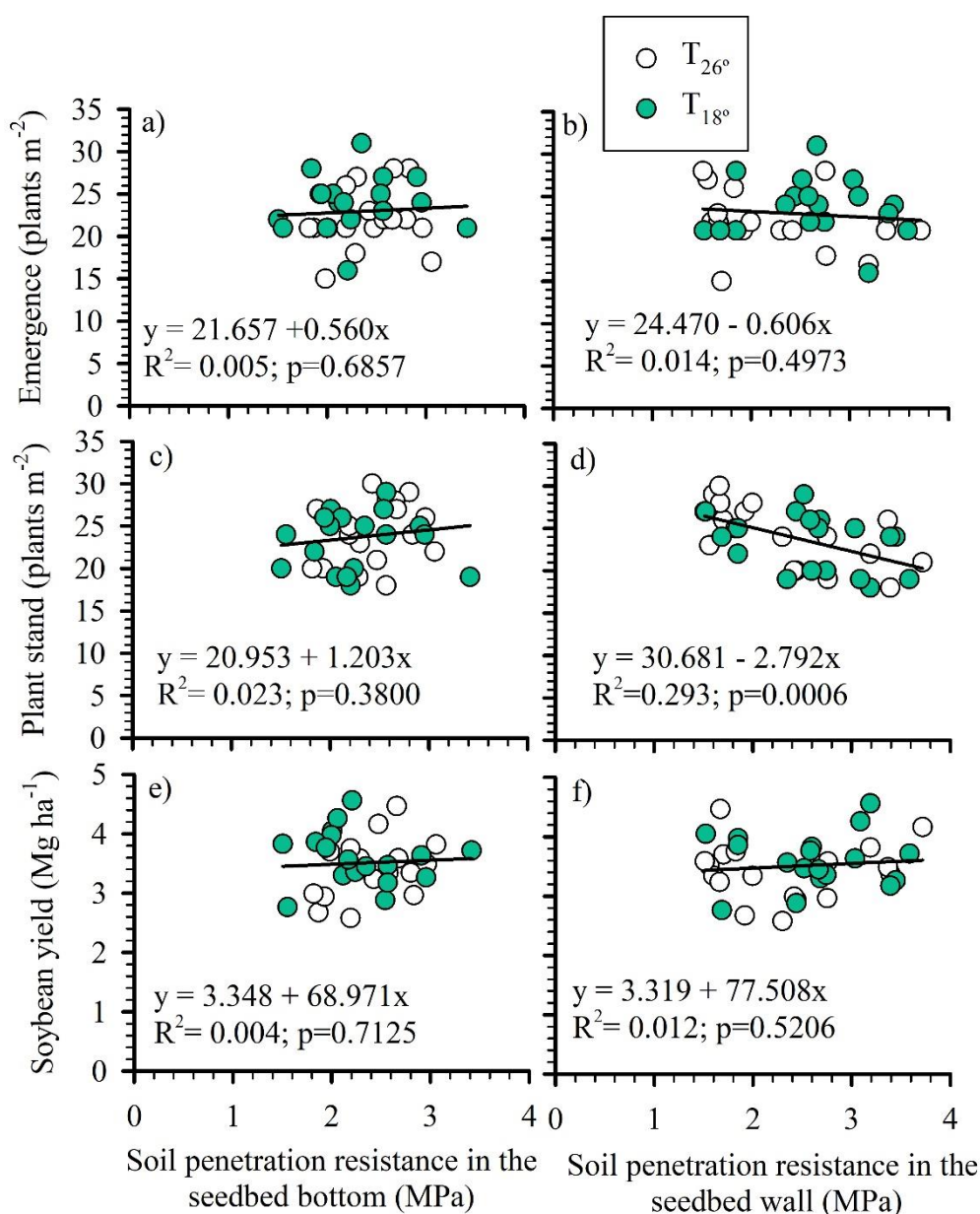


Figure 9. Relationship of soil penetration resistance measured in the bottom (a,c,e) and in the wall (b,d,f) of seedbed in relation to emergence (a,b) plant stand (c,d) and soybean yield (e,f) in an Ultisol.

In general, narrow tine furrower showed potential to overcome shallow soil compaction under no-tillage of an Oxisol in southern Brazil, promoting a more favorable physical environmental for crop growth and development down to a

depth of 0.15 m (FERREIRA *et al.*, 2023). Thus, here we shown that the smallest rake angle (18°) of furrow opener was more effective to improve soil physical quality in seedbed for soybean growing under no-tillage after compaction by tractor passes in the Ultisol.

3.4 Conclusions

The reduction of rake angle of tine from 26° to 18° (adaptive tine, T_{18°) under no-tillage in an Ultisol with sandy clay loam texture had a lower requirement for draft force, fuel consumption, and soil mobilization. Therefore, better performance of sowing operation was verified using handmade tines, with less energy demand from the tractor.

Soybean grain yield was higher in areas with use of tine furrow opener with the lowest rake angle (18°) than the use of original tine (T_{26° , attack angle of 26°). Thus, the use of T_{18° , with a smaller rake angle, resulted in a 10% decrease in fuel consumption, which helps to optimize production costs and increase the profitability of the production system.

Soybean crop parameters (plant emergence, plant stand, and soybean yield) were not limited by soil strength (soil penetration resistance) in seedbed wall and bottom of an Ultisol under no-tillage with or without tractor traffic. Thus, the seedbed physical quality was not impacted by the rake angle of tine furrow openers, as it happened for traffic level.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A redução do ângulo de inclinação da ponteira de 26° para 18° (ponteira adaptada, T_{18°}) apresentou menor exigência de força de tração, consumo de combustível e mobilização do solo em Argissolo de textura franco-arenosa sob sistema plantio direto. Assim, observou-se melhor desempenho da operação de semeadura utilizando pontas artesanais, com menor demanda de energia do trator.

A produtividade de grãos de soja foi maior nas áreas com uso de ponteira na haste sulcadora com menor ângulo de ataque (18°) do que com o uso da ponteira original (T_{26°}, ângulo de ataque de 26°). A utilização da T_{18°} resultou em redução de 10% no consumo de combustível, o que ajuda a otimizar os custos de produção e aumentar a rentabilidade do sistema produtivo.

Os parâmetros da cultura da soja (emergência de plantas, estande de plantas e rendimento de soja) não foram limitados pela resistência do solo (resistência mecânica do solo à penetração) na parede e no fundo do sulco de um Argissolo sob sistema plantio direto com ou sem tráfego de trator. Portanto, a qualidade física do solo no sulco não foi influenciada pelo ângulo de ataque da ponteira da haste sulcadora, como ocorreu para os níveis de tráfego.

REFERÊNCIAS

- ADETUNJI, A. T. *et al.* Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 204, [art.] 104717, [p. 1-11], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>. Acesso em: 18 mar. 2023.
- AIKINS, K. A. *et al.* No-tillage furrow opener performance: A review of tool geometry, settings and interactions with soil and crop residue. **Soil Research**, Melbourne, v. 58, n. 7, p. 603–621, 2020.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural tractor test code. *In: ASAE standards 1989: standards engineering practices data*. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1989. p. 44–48.
- ASKARI, M. *et al.* The effect of new wings on subsoiler performance. **Applied Engineering in Agriculture**, Raleigh, v. 32, n. 3, p. 353–362, 2016.
- AVILA, A. M. H. *et al.* Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para estação de crescimento das culturas de primavera-verão no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 149–154, 1996.
- BAKER, C. J. *et al.* **No-tillage seeding in conservation agriculture**. 2nd ed. Rome: FAO. CAB International, 2006. Disponível em: <https://www.fao.org/3/al298e/al298e00.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2023.
- BAKKER, D. M.; DAVIS, R. J. Soil deformation observations in a vertisol under field traffic. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 33, n. 5, p. 817–832, 1995.
- BARR, J. B. *et al.* Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method. **Biosystems Engineering**, London, v. 171, p. 1–15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.013>. Acesso em: 18 mar. 2023.
- BATTIATO, A.; DISERENS, E. Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 166, p. 18–32, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.09.005>. Acesso em: 18 mar. 2023.
- BAYER, C. *et al.* Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 1/2, p. 101–109, 2000.

BERTOLLO, A. M. *et al.* Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 206, [art.] 104820, 2021.

BERTONHA, R. S. *et al.* Tractor performance and corn crop development as a function of furrow opener and working depth in a Red Latosol. **Australian Journal of Crop Science**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 812–818, 2015.

BLANCO-CANQUI, H. *et al.* Addition of Cover Crops Enhances No-Till Potential for Improving Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 75, n. 4, p. 1471–1482, 2011.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, [art.] 104534, [p. 1-14], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104534>. Acesso em: 18 mar. 2023.

BONETTI, I. *et al.* **Radiografia da agropecuária Gaúcha**. Porto Alegre, RS: Departamento de Políticas Agrícolas e Desenvolvimento Rural, 2020. Disponível em: agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202009/26185534-radiografia-da-agropecuaria-gaucha-2020-1.pdf.

BONETTI, J. de A. *et al.* Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 174, p. 104–112, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008>. Acesso em: 24 abr. 2023.

BOTTA, G. F. *et al.* Agricultural traffic: motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 120, p. 92–98, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2011.11.008>. Acesso em: 18 mar. 2023.

CALONEGO, J. C. *et al.* Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, Conthey, v. 85, p. 31–37, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>. Acesso em: 18 mar. 2023.

CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R. Máquinas para manejo de vegetações e semeadura em plantio direto. *In*: CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, Y. R. **Sistema plantio direto com qualidade**. Londrina: IAPAR/ ITAIPU, 2006. p. 85–126.

CEPIK, C. T. C. **Parâmetros de solos e máquinas em semeadura direta com doses de cobertura e configurações de deposição de fertilizante**. 2006. 118 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/8905>. Acesso em: 24 abr. 2023.

CEPIK, C. T. C.; TREIN, C. R.; LEVIEN, R. Força de tração e volume de solo mobilizado por haste sulcadora em semeadura direta sobre campo nativo, em

função do teor de água no solo, profundidade e velocidade de operação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 447–457, 2005.

CHAUDHURI, D. Performance evaluation of various types of furrow openers on seed drills - A review. **Journal of Agricultural and Engineering Research**, Pavia, v. 79, n. 2, p. 125–137, 2001.

COLLINS, B. A.; FOWLER, D. B. Effect of soil characteristics, seeding depth, operating speed, and opener design on draft force during direct seeding. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 39, n. 3/4, p. 199–211, 1996.

COLOMBI, T. *et al.* Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 626, p. 1026–1035, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>. Acesso em: 18 mar. 2023.

CONTE, O. *et al.* Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 10, p. 1254–1261, 2009.

CONTE, O. *et al.* Soil disturbance index as an indicator of seed drill efficiency in no-tillage agrosystems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 114, n. 1, p. 37–42, 2011.

CUNHA, J. P. A. R.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 371–375, 2009.

DESBIOLLES, J. **Paddock yield and seeding depth optimisation**. Mildura: Mallee Sustainable Farming, 2004. Section 4, p.123–128. Disponível em: <https://www.farmtrials.com.au/trial/19822>. Acesso em: 24 abr. 2023.

DESBIOLLES, J.; TAKI, O.; BUTLER, G. A laboratory evaluation of waterjet cutting of crop residue using the Aqua-Till® liquid coulter. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, [art.] 104537, [p. 1-9], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104537>. Acesso em: 18 mar. 2023.

DRESCHER, M. S. *et al.* Fertilizer shanks to promote soil decompaction in the seeding operation. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 47, n. 3, [art.] e20160026, 2017.

FEBRAPDP - FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Evolução da área sob plantio direto no Brasil**. Foz do Iguaçu: FEBRAPDP, 2018. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/>. Acesso em: 18 mar. 2023.

FERREIRA, C. J. B. *et al.* Effectiveness of narrow tyne and double-disc openers to overcome shallow compaction and improve soybean yield in long-term no-tillage soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 227, [art.] 105622, [p. 1-10], 2023.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes**: experimental designs package. Version: 1.2.2. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=ExpDes>. Acesso em: 24 abr. 2023.

FIGUEIREDO, G. C. *et al.* Improvement of a testing apparatus for dynamometry: procedures for penetrometry and influence of strain rate to quantify the tensile strength of soil aggregates. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 373–387, 2011.

FRANCETTO, T. R. *et al.* Disturbance of Ultisol soil based on interactions between furrow openers and coulters for the no-tillage system. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 14, n. 3, [art.] e0208, 2016.

FRANCHINI, J. C. *et al.* **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. (Documentos, 327).

FREITAS, L. R. *et al.* Terracing increases soil available water to plants in no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 45, [art.] e0210046, [p. 1–15], 2021.

FUENTES-LLANILLO, R. *et al.* Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 208, [art.] 104877, [p. 1–9], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104877>. Acesso em: 18 mar. 2023.

FURLANI, C. E. A. *et al.* Demanda energética por semeadora-adubadora em função da haste sulcadora na semeadura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 60, n. 6, p. 885–889, 2013.

GODWIN, R. J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 331–340, 2007.

GODWIN, R. J.; O'DOGHERTY, M. J. Integrated soil tillage force prediction models. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 3–14, 2007.

GODWIN, R. J.; SPOOR, G. Soil failure with narrow tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Bedford, v. 22, n. 3, p. 213–228, 1977.

GROTTA, D. C. C. *et al.* Seeder-fertilizer machine: energetic demand as a function of vegetal covering handling and manure deposition shank depth in no-tillage system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 2, p. 241–248, 2009.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Valores críticos de densidade do solo avaliados por condições de contorno. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 44, n. 6, p. 994–1000, 2014.

GUEDES FILHO, O. *et al.* Structural properties of the soil seedbed submitted to

mechanical and biological chiseling under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v. 204–205, p. 94–101, 2013.

GUEDES FILHO, O.; BLANCO-CANQUI, H.; SILVA, A. P. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, Amsterdam, v. 207/208, p. 99–110, 2013.

HÅKANSSON, I.; REEDER, R. C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, n. 2/3, p. 277–304, 1994.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005.

HAN, E. *et al.* Quantification of soil biopore density after perennial fodder cropping. **Plant and Soil**, Cham, v. 394, n. 1/2, p. 73–85, 2015.

HAN, E.; KAUTZ, T.; KÖPKE, U. Precrop root system determines root diameter of subsequent crop. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 52, n. 1, p. 113–118, 2016.

HASIMU, A.; CHEN, Y. Soil disturbance and draft force of selected seed openers. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 48–54, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.02.011>. Acesso em: 18 mar. 2023.

HERNANI, V.; LOUREIRO, L. **Manual de instruções PST3**. Matão, SP: Tatu Marchesan, 2011. Disponível em: www.marchesan.com.br. Acesso em: 24 abr. 2023.

HERZOG, R.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. Produtividade de soja em semeadura direta influenciada por profundidade do sulcador de adubo e doses de resíduo em sistema irrigado e não irrigado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. v.24, n. 3, p. 771–780, 2004.

HETTIARATCHI, D. R. P.; REECE, A. R. Symmetrical three-dimensional soil failure. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 4, n. 3, p. 45–67, 1967.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE**: estatística da produção agrícola. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=72415>. Acesso em: 24 abr. 2023.

JENANE, C.; BASHFORD, L. L. Tractive performance of a mechanical front-wheel assist tractor as related to forward speeds. **Journal of Agricultural and Engineering Research**, Amsterdam, v. 77, n. 2, p. 221–226, 2000.

KAMIMURA, K. M. *et al.* Parameters of soil-machine in function of the amount of cover residues and different fertilizer deposition depths in direct drilling.

Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 431–439, 2009.

KELLER, T. *et al.* Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, [art.] 104293, [p. 1-12], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>. Acesso em: 24 abr. 2023.

KELLER, T. *et al.* SoilFlex-LLWR: Linking a soil compaction model with the least limiting water range concept. **Soil Use and Management**, Wallingford, v. 31, n. 2, p. 321–329, 2015.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000.

KUSS, R. C. R. *et al.* Populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 38, n. 4, p. 1133–1137, 2008.

LEVIEN, R. *et al.* Semeadura direta de milho com dois tipos de sulcadores de adubo, em nível e no sentido do declive do terreno. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 41, n. 6, p. 1003–1010, 2011.

LIMA, R. P. *et al.* Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 215, [art.] 105215, [p. 1–9], 2022.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 15–29, 2003.

LIU, H. *et al.* Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 807, [art.] 150763, [p. 1-9], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150763>. Acesso em: 18 mar. 2023.

MARTINS, A. L. S. *et al.* **Avaliação ex ante do Índice de Qualidade Participativo do Plantio Direto (IQP) com produtores do centro-sul do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. (Documentos, 203).

MAZURANA, M. *et al.* Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 1, p. 60–71, 2017.

MCLAUGHLIN, N. B.; CAMPBELL, A. J.; OWEN, G. T. Performance of hoe and triple disc furrow openers on no-till grain drills in a fine sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 195, [art.] 104373, [p. 1-8], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104373>. Acesso em: 24 abr. 2023.

MENEGATI, G. B. **Estratégias de manejo para minimizar estresse por deficiência hídrica e para potencializar rendimento de grãos em milho sob condições de irrigações**. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado) Programa de

Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MONDAL, S.; CHAKRABORTY, D. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 405, [art.] 115443, [p. 1-11], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>. Acesso em: 18 mar. 2023.

MORAES, M. T. *et al.* Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 53, n. 4, p. 464–477, 2018.

MORAES, M. T. *et al.* Limites críticos de resistência à penetração em um latossolo vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 1, p. 288–298, 2014.

MORAES, M. T. *et al.* Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 200, [art.] 104611, [p. 1-14], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>. Acesso em: 18 mar. 2023.

MORAES, M. T. *et al.* Soil load support capacity increases with time without soil mobilization as a result of age-hardening phenomenon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, p. 128–134, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.009>. Acesso em: 18 mar. 2023.

MORAES, M. T. *et al.* Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil water content. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 4, p. 748–757, 2013.

MORAES, M. T.; GUSMÃO, A. G. How do water, compaction and heat stresses affect soybean root elongation? A review. **Rhizosphere**, Amsterdam, v. 19, [art.] 100403, [p. 1–10], 2021.

MOREIRA, W. H. *et al.* Quantificação do intervalo hídrico Ótimo de um latossolo vermelho utilizando duas estratégias metodológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 6, p. 1772–1783, 2014.

MULAZZANI, R. P. *et al.* Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 203, [art.] 103523, [p. 1–14], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103523>. Acesso em: 18 mar. 2023.

MÜLLER, J. *et al.* Tractive demand , soil mobilization parameters, and corn yield in compacted Oxisol. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, n; 1, p. 89–96, 2019.

MURRAY, J. R.; TULLBERG, J. N.; BASNET, B. B. **Planters and their components**: types, attributes, functional requirements, classification and description. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 2006. (ACIAR Monograph, no. 121).

NUNES, M. R. *et al.* Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 627–638, 2014.

NUNES, M. R. *et al.* Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 119–126, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.12.007>. Acesso em: 18 mar. 2023.

NUNES, M. R. *et al.* No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield. **Geoderma**, Amsterdam, v. 328, p. 30–43, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.031>. Acesso em: 18 mar. 2023.

O’SULLIVAN, M. F.; HENSHALL, J. K.; DICKSON, J. W. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 325–335, 1999.

OBOUR, P. B.; UGARTE, C. M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 211, [art.] 105019, [p. 1-12], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>. Acesso em: 18 mar. 2023.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, Amsterdam, v. 100, p. 139–147, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.006>. Acesso em: 18 mar. 2023.

PEIXOTO, D. S. *et al.* Diagnosing, ameliorating, and monitoring soil compaction in no-till brazilian soils. **Agrosystem, Geosciences & Environment**, Madison, v. 2, [art.] 180035, [p. 1-14], 2019.

PEIXOTO, D. S. *et al.* Occasional tillage in no-tillage systems: a global meta-analysis. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 745, [art.] 140887, [p. 1-14], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140887>. Acesso em: 18 mar. 2023.

POSSAMAI, E. J. *et al.* Adoption of the no-tillage system in Paraná State: a (re)view. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 46, p. 1–24, 2022.

PURCELL, W.; NEUBAUER, T. Digital twins in agriculture : a state-of-the-art review. **Smart Agricultural Technology**, Amsterdam, v. 3, [art.] 100094, [p. 1-11], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>. Acesso em: 18 mar. 2023.

R CORE TEAM, **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012.

REDIN, M. *et al.* Root and shoot contribution to carbon and nitrogen inputs in the topsoil layer in no-tillage crop systems under subtropical conditions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 42, p. 1–16, 2018.

REICHERT, J. M. *et al.* Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.

RUGERI, A. *et al.* **Relatório estiagem 05/2022 – SEAPDR**. Porto Alegre: SEAPDR, 2022. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/pro-oliva>. Acesso em: 24 abr. 2023.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. *et al.* Effect of soil compaction and water content on the resulting forces acting on three seed drill furrow openers. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 25–37, 2005.

SANTOS, H. G. *et al.* **Brazilian soil classification system**. 5th ed. rev. and exp. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181678/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358219-english.epub>. Acesso em: 24 abr. 2023.

SELLES, F. *et al.* Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1/2, p. 23–34, 1997.

SENTELHAS, P. C. *et al.* The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.

SERPA, M. S. *et al.* Densidade de plantas em híbridos de milho semeados no final do inverno em ambientes irrigados e de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 4, p. 541–549, 2012.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014-.

SOLHJOU, A.; FIELKE, J. M.; DESBIOLLES, J. M. A. Soil translocation by narrow openers with various rake angles. **Biosystems Engineering**, London, v. 112, n. 1, p. 65–73, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.02.006>. Acesso em: 18 mar. 2023.

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, The Hague, v. 185, n. 1, p. 151–162, 1996.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. v. 3

TELLES, T. S. *et al.* Soil management practices adopted by farmers and how they perceive conservation agriculture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 46, p. 1–13, 2022.

TORMENA, C. A. *et al.* Quantification of the soil physical quality of a tropical

oxisol using the s index. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 1, p. 56–60, 2008.

TROGER, H. C. H. *et al.* Analyzing the efforts in furrow openers used in low power planters. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 6, p. 1133–1143, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/eagri/a/9qfq7b967YDW9qcX8BGHKPH/abstract/?lang=e>. Acesso em: 21 nov. 2022.

VEIGA, M. *et al.* Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1/2, p. 104–113, 2007.

VELOSO, M. G. *et al.* High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 268, p. 15–23, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.024>. Acesso em: 18 mar. 2023.

WANG, M. *et al.* Effects of soil compaction on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soybean seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 26, n. 22, p. 22835–22845, 2019.

WENDEL, A. S. *et al.* Root-rhizosphere-soil interactions in biopores. **Plant and Soil**, Cham, v. 475, p. 253-277, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05406-4>. Acesso em: 18 mar. 2023.

APÊNDICES

Apêndice 1. Atributos químicos do solo para os níveis de tráfego na camada de 0–20 cm.

Parcela	NT _{C2}	NT _{C4}	NT _{C8}	NT _{C12}	NT ₈	NT
Argila (%)	32	28	28	32	29	30
pH (H ₂ O)	4,2	3,8	4,1	4,1	4,1	4,2
P (mg dm ⁻³)	11	6,8	8,8	7,7	6,0	12,0
K (mg dm ⁻³)	129	127	181	151	140	133
MO (%)	1,7	1,6	1,8	1,6	1,7	1,6
Al (cmol _c dm ⁻³)	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	7,7	6,9	7,7	7,7	6,2	6,9
CTC (cmol _c dm ⁻³)	10,4	9,3	10,3	10,2	9,0	9,8
V (%)	26	25	26	24	31	29
m (%)	32,0	35,5	32,6	32,3	28,2	27,7
S (mg dm ⁻³)	8,0	8,4	7,7	8,6	7,3	7,2
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,5	1,2	1,3	1,3	1,5	1,5
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	1,0

P – fósforo; K – potássio; MO – matéria orgânica; Al – alumínio trocável; H+Al – hidrogênio + alumínio trocável; CTC a pH 7,0; V (%) – saturação de bases; m – saturação de alumínio; S – enxofre; Ca – cálcio; Mg – magnésio.

Apêndice 2. Croqui do experimento de estudos em compactação do solo utilizado para obtenção dos dados deste estudo.

