

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Lucas Lopes Coelho

**MANEJO DO SOLO PARA O CULTIVO
DE SOJA EM TERRAS BAIXAS**

Santa Maria-RS, Brasil
2022

Lucas Lopes Coelho

**MANEJO DO SOLO PARA O CULTIVO
DE SOJA EM TERRAS BAIXAS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Agronomia.**

Orientador: Prof. Dr. Enio Marchesan

Santa Maria-RS, Brasil
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

Lopes Coelho, Lucas
MANEJO DO SOLO PARA O CULTIVO DE SOJA EM TERRAS
BAIXAS / Lucas Lopes Coelho.- 2022.
114 p.; 30 cm

Orientador: Enio Marchesan
Coorientador: Sidnei José Lopes
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Agronomia, RS, 2022

1. Glycine max (L.) Merrill 2. Planossolo 3.
Compactação 4. Plantabilidade 5. Demanda energética I.
Marchesan, Enio II. José Lopes, Sidnei III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, LUCAS LOPES COELHO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

© 2022

Todos os direitos autorais reservados a Lucas Lopes Coelho. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

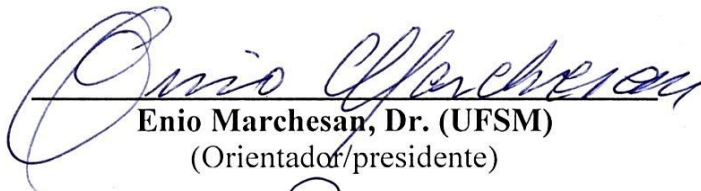
E-mail: lucas_l_c@hotmail.com


Lucas Lopes Coelho


**MANEJO DO SOLO PARA O CULTIVO
DE SOJA EM TERRAS BAIXAS**

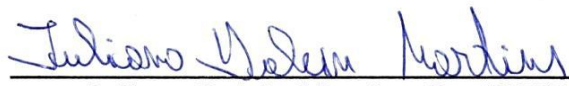
Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Agronomia**.


Aprovado em 17 março de 2022:


Enio Marchesan, Dr. (UFSM)
(Orientador/presidente)


Alfran Tellechea Martini, Dr. (UFSM) Videoconferência


Glauber Monçon Fipke, Dr. (UNIPAMPA) Videoconferência


Juliano Dalcin Martins, Dr. (UFSM) Videoconferência


Marta Sandra Drescher, Dra. (UERGS) Videoconferência

DEDICATÓRIA

A minha família, em especial aos meus pais, Clovis Cogo Coelho e Elisabeth Lopes Coelho, bem como a minha noiva, Dariane Trivisiol da Silva, por todo o apoio, incentivo, compreensão e carinho recebidos no transcorrer desta árdua jornada.

A vocês, minha eterna gratidão!

AGRADECIMENTOS

A Deus pela graça da vida, da família e da saúde.

Aos meus pais, Clovis Cogo Coelho e Elisabeth Lopes Coelho que são minha base, meu porto seguro e minha eterna fonte de motivação e admiração. Sei que muitos sacrifícios foram feitos para eu pudesse buscar meus sonhos, por isso, agradeço-lhes de coração.

À minha noiva e companheira Dariane Trivisiol da Silva, o maior exemplo de “SER” humano que tive a grata oportunidade de conhecer e dividir a vida.

Ao meu avô Joaires Rodrigues Coelho por não medir esforços em nós ajudar nos momentos de dificuldade. Sua integridade e alegria para sempre serão lembradas. “In memoriam”.

Ao professor Enio Marchesan pelo exemplo profissional, orientação e fundamentalmente, pela amizade construída ao longo de mais de uma década de convivência.

Aos colegas e amigos de pós-graduação Bruno Aramburu, Gabriel Donato, Robson Giacomeli, Deivyd Oliveira, Luiz Fernando Flores de Siqueira, Caren da Rosa e Alisson Fleck pelo convívio e apoio na elaboração e condução dos experimentos a campo e em laboratório.

Aos estagiários do Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado (GPAI) Eduardo Cassanego, Uashington Riste, Mariana Wruck, Anna Karsurg, Zanandra Zanini, Julian Pfeifer, Gilmar do Monte e Tiago Weise pelo auxílio na execução dos trabalhos a campo. Sem o comprometimento dessa equipe, nada seria possível.

Ao meu estagiário e grande amigo Augusto Dubou Serafin pelo comprometimento na execução de todas as etapas do estudo. Com certeza tua leveza e modo alegre de ver a vida ajudaram a tornar o meu período de doutoramento mais “sereno”.

Ao meu amigo Michel Streppel Cabral por me ensinar que a vida não deve ser apenas vivida e sim, celebrada. “In memoriam”

À Universidade Federal de Santa Maria pelo ensino de qualidade durante minha formação acadêmica, através da graduação, mestrado e doutorado.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Laboratório de Agrotecnologia (AGROTEC) da UFSM, nas pessoas do professor José Fernando Scholoser e dos alunos Leonardo Casali e Junior Osmari pela parceria na obtenção dos dados referentes a mecanização agrícola.

Ao Laboratório de Fisiologia Vegetal (FisioLab) da UFSM, nas pessoas do professor Fernando Teixeira Nicoloso e da aluna Raíssa Schwalbert pela colaboração na determinação dos dados referentes aos parâmetros radiculares da soja.

Aos membros da banca avaliadora Juliano Dalcin Martins, Marta Sandra Drescher, Glauber Monçon Fipke e Alfran Tellechea Martini pela disponibilidade em contribuir no aprimoramento do trabalho de tese.

E para todos que, de alguma forma contribuíram para a execução desse trabalho, meu sincero muito obrigado.

A melhor aposta é apostar em si mesmo!
(ARNOLD GLASOW)

RESUMO

MANEJO DO SOLO PARA O CULTIVO DE SOJA EM TERRAS BAIXAS

AUTOR: Lucas Lopes Coelho
ORIENTADOR: Enio Marchesan

O cultivo da soja em rotação com o arroz irrigado é uma importante alternativa na busca por sustentabilidade econômica das áreas de terras baixas. Entretanto, as características de drenagem deficiente e elevada compactação desses solos resultam em frequentes períodos de estresse hídrico às plantas. Como resultado, importantes processos metabólicos podem ser afetados, a exemplo da fixação biológica de nitrogênio e da taxa fotossintética. A utilização de manejos mecânicos do solo e plantas de cobertura pode ser uma importante estratégia na busca por um cultivo com maior estabilidade produtiva. Nesse contexto, foi desenvolvido em um Planossolo Háptico um estudo de dois anos, safra agrícola 2019/20 e 2020/21. Os resultados geraram três artigos, os quais tiveram como objetivo: verificar o efeito de manejos mecânicos do solo e de mecanismos da semeadora sobre a qualidade de distribuição de sementes e o estabelecimento inicial de plantas de soja (capítulo I); determinar o consumo energético da descompactação e a eficiência de manejos mecânicos e uso de azevém na atenuação de problemas de ordem física do solo para o cultivo da soja em terras baixas (Capítulo II); avaliar manejos do solo, cultivo de azevém e uso de mecanismos de deposição do fertilizante na semeadora sobre o desenvolvimento da soja em área de terras baixas (Capítulo III). O experimento foi composto por um bifatorial 6x2. Os níveis do fator A foram implantados na safra 2019/20, sendo composto por manejos do solo na entressafra e mecanismos de deposição do fertilizante de uma semeadora-adubadora: (A1) sem preparo do solo (SPS)+disco duplo na semeadora (DD); (A2) SPS+haste sulcadora (HS) desencontrada; (A3) SPS+HS+mecanismo de acomodação do solo (MAS); (A4) escarificado+DD; (A5) grade aradora+DD e (A6) subsolado+DD. O fator D foi implantado previamente a colheita da soja no primeiro ano de estudo, sendo composto pelo cultivo do azevém na entressafra (D1) e pousio da área (D2). Na safra 2020/21 foi adicionado o tratamento Escarificado em 2020+DD. Já manejo grade aradora+DD foi suprimido. O MAS associado à HS viabiliza melhor qualidade de distribuição das sementes em profundidade, ademais, o rompimento da camada compactada mostrou-se crucial no estabelecimento de um adequado estande inicial de plantas. Na semeadora, a HS reduz a resistência à penetração mecânica (RP) do solo na linha de cultivo, contudo, aumenta o consumo energético do trator quando comparada ao DD. Entre os manejos de entressafra, a escarificação apesar da baixa capacidade operacional proporciona a melhoria dos parâmetros físicos do solo na linha e na entrelinha de semeadura (RP e macroporosidade), sendo parte dessas melhorias perceptíveis por pelo menos 15 meses após a intervenção. No desenvolvimento de plantas, o manejo SPS+DD reduz o crescimento radicular, a capacidade fotossintética e a produtividade de grãos da soja quando comparada aos demais tratamentos. O azevém em uma única safra agrícola não influencia nos processos de acomodação das partículas do solo, bem como na produtividade de grãos da soja.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill. Planossolo. Compactação. Plantabilidade. Demanda energética.

ABSTRACT

SOIL MANAGEMENT FOR SOYBEAN CULTIVATION IN LOWLANDS

AUTHOR: Lucas Lopes Coelho

ADVISOR: Enio Marchesan

Soybean cultivation in rotation with irrigated rice is an important alternative in the seek for economic sustainability in lowland areas. However, the characteristics of poor drainage and high compaction of these soils result in frequent periods of water stress to the plants. As a result, important metabolic processes can be affected, such as nitrogen biological fixation and photosynthetic rate. The use of mechanical soil management and cover crops may be an important strategy in the seek for a crop with greater yield stability. A two-year study was carried out in an Albaqualf, at the growing-seasons 2019/20 and 2020/21. The results generated three papers, which aimed to: verify the effect of mechanical soil management and seeder mechanisms on the quality of seed distribution and the initial establishment of soybean plants (chapter I); to determine the energy consumption of decompaction and the efficiency of mechanical management and use of Italian ryegrass in mitigating soil physical problems for soybean cultivation in lowlands (Chapter II); to evaluate soil management, Italian ryegrass cultivation and use of fertilizer deposition mechanisms in the seeder on soybean development in lowland areas (Chapter III). The experiment consisted of a 6x2 bifactorial. Factor A levels were implanted in the 2019/20 crop season, consisting of soil management in the off-season and fertilizer deposition mechanisms of a seeder-fertilizer: (A1) no soil preparation (NSP)+double disc (DD); (A2) NSP+chisel (CH) not aligned; (A3) NSP+CH+soil accommodation mechanism (SAM); (A4) scarified+DD; (A5) disc harrow+DD and (A6) chisel tillage+DD. Factor D was implemented prior to soybean harvesting in the first year of the study, consisting of ryegrass cultivation in the off-season (D1) and fallow (D2). In the 2020/21 crop season, the Scarified in 2020+DD treatment was added, while the disc harrow+DD management was suppressed. The SAM associated with the CH promotes better quality of depth seed distribution, in addition, the rupture of the compacted layer proved to be crucial in the establishment of an adequate initial stand of plants. In the seeder, the CH reduces the resistance to mechanical penetration (MP) of the soil in the crop row, however, it increases the energy consumption of the tractor when compared to the DD. Among the off-season managements, scarification, despite the low operational capacity, improves the physical parameters of the soil in the row and between the crop rows (MP and macroporosity), being part of these improvements noticeable for at least 15 months after the intervention. In plant development, NSP+DD management reduces root growth, photosynthetic capacity and soybean grain yield when compared to other treatments. The Italian ryegrass in a single crop does not influence the processes of re-accommodation of soil particles, as well as the soybean grains yield.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill. Lowlands. Compaction. Plantability. Energy demand.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

- FIGURA 1 - Precipitação pluviométrica, temperatura máxima do ar e evapotranspiração de referência (ET_o) na área experimental de terras baixas da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) durante o período de semeadura e estabelecimento inicial das plantas de soja na safra agrícola 2019/20. Santa Maria, RS. 2021. PIP*: população inicial de plantas.45

ARTIGO II

- FIGURA 1 - Distribuição da resistência do solo à penetração mecânica em semeadura SPS+DD (A), SPS+HS desencontrada (B), SPS+HS+MAS (C), escarificado+DD (D), grade aradora+DD (E) e subsolado+DD (F) em área de terras baixas compactada. A umidade volumétrica do solo na camada de 0 a 0,3 m de profundidade era de 0,29 m³ m⁻³. Safra 2019/20. Santa Maria, RS. 2021. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo. DD: disco duplo.68
- FIGURA 2 - Distribuição da resistência do solo à penetração mecânica em semeadura SPS+DD (A e B), SPS+HS+MAS (C e D), escarificado em 2019+DD (E e F), escarificado em 2020+DD (G e H) e subsolado em 2019+DD (I e J), sem azevém (A, C, E, G e I) e com azevém (B, D, F, H, J) na entressafra em área de terras baixas compactada. A umidade volumétrica do solo na camada de 0 a 0,3 m era de 0,27 m³ m⁻³. Safra 2020/21. Santa Maria, RS. 2021. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo. DD: disco duplo.69
- FIGURA 3 - Distribuição do sistema radicular da soja em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora: (A) SPS+DD, (B) SPS+HS desencontrada, (C) SPS+HS+MAS, (D) escarificado+DD, (E) grade aradora+DD e (F) subsolado+DD na safra agrícola 2019/20. Malha de 0,05x0,05 m. Santa Maria, RS. 2021. SPS: sem preparo do solo; DD: disco duplo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo.....70

ARTIGO III

FIGURA 1 - Resistência à penetração mecânica (RP) na linha de semeadura em função de manejos do solo e do uso de azevém na entressafra em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021. A umidade volumétrica na avaliação de RP era de $0,29 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e $0,27 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, respectivamente para as safras 2019/20 e 2020/21 (camada de 0 a 0,3 m de profundidade). DD: disco duplo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação de solo. ^{ns} não significativo. (A) safra 2019/20; (B) fator A safra 2020/21 e (C) fator D safra 2020/21..... 90

FIGURA 2 - Umidade volumétrica e espaço aéreo (EA) do solo nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m de profundidade durante a safra agrícola 2019/20 nos tratamentos SPS+DD, SPS+HS+MAS, escarificado (Ripper)+DD e subsolado (Terrus)+DD em área de terras baixas com camada compactada. Santa Maria, RS. 2021. DD: disco duplo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo. CC: capacidade de campo. PMP: ponto de murcha permanente..... 94

FIGURA 3 - Temperatura máxima do ar (°C), precipitação pluviométrica diária (mm) e evapotranspiração de referência (ET_o) durante as safras agrícolas 2019/20 (A) (01/09/2019 a 09/04/2020) e 2020/21 (B) (20/10/20 a 09/04/2021). Santa Maria, RS. 2021.....95

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I

- TABELA 1 - Distribuição longitudinal (duplas, aceitáveis e falhas) e vertical (desvio padrão, profundidade média e variação na profundidade) de sementes em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021..... 43
- TABELA 2 - Índice de velocidade de emergência (IVE), plantas mortas, porcentagem de estabelecimento, população inicial (PIP) e distribuição longitudinal de plantas [desvio padrão (DP) e distância mínima, média e máxima] em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021..... 44

ARTIGO II

- TABELA 1 - Velocidade de deslocamento do conjunto mecanizado, força de tração, potência em tração e patinamento das rodas motrizes em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Safra 2019/20. Santa Maria, RS. 2021..... 64
- TABELA 2 - Capacidade operacional, consumo e custo de combustível em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Safra 2019/20. Santa Maria, RS. 2021. 65
- TABELA 3 - Densidade, macroporosidade e porosidade total na linha e na entrelinha de semeadura em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Safra 2019/20. Santa Maria, RS. 2021..... 66
- TABELA 4 - Densidade, macroporosidade e porosidade total do solo na linha de semeadura em função de manejos do solo na entressafra, de mecanismos de deposição do

fertilizante da semeadora-adubadora e do uso de azevém em área de terras baixas compactada. Safra 2020/21. Santa Maria, RS. 2021.....67

TABELA 5 - Produtividade relativa de grãos da soja em função de manejos do solo na entressafra, de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora e do uso de azevém na entressafra em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.....	71
---	----

ARTIGO III

TABELA 1 - Propriedades físico-químicas da área de instalação do experimento no mês de setembro de 2019. Santa Maria, RS. 2021.	89
--	----

TABELA 2 - População inicial de plantas (PIP) e comprimento da raiz principal (CRP) nos estádios fenológicos V7/V8 e R5.1 e comprimento (C), área superficial (AS), volume relativo (VR) e diâmetro médio (DM) do sistema radicular da soja em função de manejos do solo e do uso de azevém em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.....	91
---	----

TABELA 3 - Massa seca da parte aérea (MSPA), estatura de plantas e massa seca de nódulos (MSN) da soja nos estádios fenológicos V7/8 e R5.1 em função de manejos do solo e do uso de azevém em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.....	92
---	----

TABELA 4 - Taxa de assimilação líquida do carbono (A), condutância estomática (GS), concentração interna de CO ₂ (CI) e produtividade de grãos da soja em função de manejos do solo e do uso de azevém em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.....	93
---	----

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Descrição físico-química dos horizontes diagnósticos de um Planossolo Háplico Alumínico gleissólico. Santa Maria, RS. 2021.....	101
ANEXO B - Descrição morfológica do perfil solo (Planossolo Háplico Alumínico gleissólico) da área experimental de terras baixas do departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2021.....	102
ANEXO C - Descrição dos equipamentos utilizados para a implantação dos tratamentos referentes aos manejos de solo na entressafra e na semeadura da soja. Santa Maria, RS. 2021.....	103
ANEXO D - Detalhe da haste no formato parabólico do escarificador Ripper (A) e no formato reto inclinado do Subsolador Terrus (B). Santa Maria, RS. 2021.	104
ANEXO E - Instrumentação eletrônica utilizada para a obtenção dos parâmetros referentes ao consumo energético do conjunto mecanizado: força de tração, patinamento e consumo de combustível. Santa Maria, RS. 2021.	105
ANEXO F - Mobilização do solo em função dos manejos com escarificação (Escarificador Ripper 11 hastes espaçadas a 0,3 m, São José - Figura A), grade aradora (14 discos, Tatu - Figura B) e subsolagem (Subsolador Terrus 6 hastes espaçadas 0,6 m, GTS do Brasil - Figura C) em área de terras baixas compactada. * Quadrículas espaçadas 0,05x0,05 m.	106
ANEXO G - Equipamentos referentes aos manejos do solo com escarificação (Figura A), subsolagem (Figura B) e grade aradora (Figura C), bem como a comparação da mobilização da superfície do solo pelos referidos equipamentos (Figura D). Santa Maria, RS. 2021.	107
ANEXO H - Detalhe do fechamento do sulco deixado pala haste sulcadora (A) e da deposição de sementes com auxílio do mecanismo de acomodação do solo (MAS) (B); drenagem em subsuperfície 5 h após precipitação de 34 mm no sistema sem preparo do solo + disco duplo (C) e haste sulcadora + MAS (D); detalhe da uniformidade de deposição das sementes no sistema sem preparo do solo + disco duplo (E); detalhe do MAS (F). Santa Maria, RS. 2021.	108

ANEXO I - Distribuição das sementes de soja em função do manejo do solo e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada: Disco duplo a 0,08 m de profundidade (A); Haste sulcadora a 0,20 m + mecanismo de acomodação de solo (B) e Haste sulcadora desencontrada a 0,23 m (C). Santa Maria, RS. 2021.....	109
ANEXO J - Desenvolvimento inicial das plantas de soja a campo nos sistemas: SPS+HS desencontrada, SPS+DD e escarificado+DD (A) e desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular das plantas 31 dias após a semeadura da soja (B) em área de terras baixas com camada compactada. Santa Maria, RS. 2021. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. DD: disco duplo.	110
ANEXO K - Áreas sem preparo do solo na entressafra de 2019 semeadas com disco duplo na semeadora: sem planta de cobertura (A) e com azevém durante a entressafra de 2020 (B); Áreas como mobilização do solo na entressafra de 2019 associadas ao azevém durante entressafra de 2020: subsolada (C) e escarificada (D). Avaliação realizada em agosto de 2020. Santa Maria, RS. 2021.....	111
ANEXO L - Escarificação realizada em setembro de 2019: sem azevém (A) e com azevém durante a entressafra de 2020 (B). Avaliação realizada no mês de agosto de 2020, 11 meses após a escarificação. Santa Maria, RS. 2021..	112
ANEXO M - Comparativo entre as áreas no momento da escarificação do tratamento Escarificado em 2020+DD: área em pousio na entressafra (A) e área com azevém na entressafra (B). Santa Maria, RS. 2021.	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Taxa de assimilação líquida de carbono ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).
AS	Área superficial (cm^2).
ATP	Adenosina trifosfato.
C	Comprimento (cm).
CC	Capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).
CI	Concentração intracelular de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$).
CO_2	Dióxido de carbono.
CTC	Capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).
DASS	Dias após a semeadura da soja.
DD	Disco Duplo.
DM	Diâmetro médio (mm).
Ds	Densidade do solo (Mg m^{-3}).
EA	Espaço aéreo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).
ETo	Evapotranspiração de referência.
FBN	Fixação biológica de nitrogênio.
FT	Força de tração (KN).
GS	Condutância estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).
HS	Haste sulcadora.
IRGA	Infra Red Gas Analyser.
IVE	Índice de velocidade de emergência.
MA	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).
MAS	Mecanismo de acomodação do solo.
MI	Microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).
MO	Matéria orgânica.
MPa	Megapascal.
MS	Massa seca.
MSE	Manejo do solo na entressafra.
MSN	Massa seca de nódulos.
MSPA	Massa seca de parte aérea.
MSR	Massa seca de raiz.
NEMA	Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas.

PIP	População inicial de plantas.
PMP	Ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).
PT	Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).
RP	Resistência à penetração mecânica (MPa).
RPM	Rotações por minuto.
SPS	Sem preparo do solo.
TDA	Tração dianteira auxiliar.
UE	Unidade experimental.
VR	Volume relativo (cm^3).

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Gramas.
kg	Quilograma.
m	Metro.
cm	Centímetro.
ha	Hectare.
km h ⁻¹	Quilômetros por hora.
kg ha ⁻¹	Quilogramas por hectare.
m ²	Metro quadrado.
m ³	Metro cúbico.
h	Hora.
mm	Milímetro.
g kg ⁻¹	Gramas por quilograma.
cm ³	Centímetro cúbico.
m ³ m ⁻³	Metro cúbico por metro cúbico.
ha h ⁻¹	Hectares por hora.
L ha ⁻¹	Litros por hectare.
L h ⁻¹	Litros por hora.
Mg m ⁻³	Megagrama por metro cúbico.
°C	Graus Celsius.
sc ha ⁻¹	Sacas por hectare.
s	Segundo.
μmol	Micromol.
dm ⁻³	Decímetro cúbico.
cmolc	Centimol de carga.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.2	OBJETIVOS.....	31
1.2.1	Objetivo geral.....	31
1.2.2	Objetivos específicos.....	31
2	ARTIGO I	32
2.1	RESUMO	32
2.2	ABSTRACT	32
2.3	INTRODUÇÃO.....	33
2.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
2.6	CONCLUSÕES	40
2.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
3	ARTIGO II.....	47
3.1	RESUMO	47
3.2	ABSTRACT	48
3.3	INTRODUÇÃO.....	48
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.5.1	Safra agrícola 2019/20	54
3.5.2	Safra agrícola 2020/21	58
3.6	CONCLUSÕES	60
3.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
4	ARTIGO III	72
4.1	RESUMO	72
4.2	ABSTRACT	73
4.3	INTRODUÇÃO.....	73
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	75
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.5.1	Safra agrícola 2019/20	78
4.5.2	Safra agrícola 2020/21	81
4.6	CONCLUSÕES	84

4.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
6	CONCLUSÕES	99
6.1	ARTIGO I	99
6.2	ARTIGO II.....	99
6.3	ARTIGO III.....	99
	ANEXOS	101
	VITA.....	114

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas de maior importância global para a alimentação humana e animal, sendo produzidas na safra 2020/21 mais de 360 milhões de toneladas do grão em todo o mundo (CONAB, 2021). Destas, aproximadamente 135 milhões de toneladas tiveram como origem o Brasil, tornando o país o maior produtor e exportador do grão. Em nível nacional, o Rio Grande do Sul (RS) se destaca como um dos maiores produtores do país, com uma área semeada de aproximadamente seis milhões de hectares (CONAB, 2021). No Estado, historicamente o cultivo da leguminosa se concentrou nas chamadas terras altas, ou de coxilha. Contudo, os elevados preços alcançados pela commodity nas últimas safras, associado à possibilidade de rotacionar ingredientes ativos de herbicidas tem despertado o interesse de produtores inseridos em outros ambientes de produção.

Nesse contexto, o RS possui aproximadamente três milhões de hectares com a infraestrutura necessária para o cultivo do arroz irrigado (reservatórios e estruturas de condução e distribuição de água). Destas, apenas cerca de um milhão são destinadas anualmente ao cultivo do cereal, permanecendo o restante das áreas em pousio ou subutilizadas com a pecuária extensiva. Diante desse cenário, a soja ingressou nesse ambiente como uma ferramenta para reincorporar ao sistema produtivo do arroz áreas com elevada infestação de plantas daninhas resistentes a herbicidas, com destaque para o arroz vermelho (*Oryza sativa* L). Na sequência da evolução do cultivo nessas áreas, o aprendizado de técnicos e produtores rurais viabilizou que na safra 2020/21 a cultura fosse semeada em sistema de rotação com o arroz irrigado em mais de 370 mil hectares no Estado.

Contudo, diversos são os desafios para que se estabeleça um cultivo economicamente rentável de soja nesse ambiente. Destacam-se como principais fatores limitantes a topografia predominantemente plana, a formação de um ambiente hidromórfico com severa restrição a drenagem da água, o elevado grau de compactação em subsuperfície e a baixa capacidade dos solos em realizar trocas gasosas em profundidade. Nesse contexto, a escolha da área (risco de enchente), associada à adequação da mesma através do nivelamento superficial, da drenagem de superfície e da correção do pH surgem como os primeiros aspectos técnicos a serem observados.

Dominado o fluxo das águas, melhorar o ambiente de desenvolvimento radicular, e com isso, reduzir o tempo em que as plantas permanecem sob estresse hídrico durante seu ciclo de desenvolvimento parecem ser o próximo “passo” para a obtenção de elevados tetos

produtiva da soja em terras baixas. Para isso, determinar as características (profundidade e espessura) da camada de maior limitação física é crucial para se alcance maior assertividade em relação ao manejo.

Desse modo, o uso de ferramentas que possibilitem o rompimento de ao menos parte da camada de maior restrição física do solo é fundamental para que outras práticas de manejo possam se expressar em seu potencial máximo (adubação, escolha de cultivares, tratamentos fitossanitários e etc...). Dentre as alternativas para tal, pode-se citar a própria semeadora-adubadora como meio de melhorar o ambiente radicular das plantas na linha de cultivo. A escolha do mecanismo de deposição do fertilizante e da profundidade de atuação do mesmo irá definir o seu potencial de mitigação de estresses. Somado a isso, há que se considerar também a qualidade de deposição das sementes no leito de semeadura, uma vez que o aprofundamento de tais mecanismos, tal como a haste sulcadora, tendem a entregar uma condição de solo mais precária para o dosador de sementes.

Como opções de entressafra ou pré-semeadura, destacam-se os escarificadores e subsoladores, os quais têm como principais particularidades a mobilização do solo em maior profundidade, a necessidade de operações extras e o elevado consumo de combustível. Nestes equipamentos, a eficiência está atrelada as características dos equipamentos e a umidade do solo no momento do manejo. Em função da drenagem deficiente no perfil desses solos, especialmente durante o outono-inverno, implantar esses manejos no momento de maior resposta é um desafio.

Como contraponto, o elevado custo energético associado à efemeridade de seus efeitos benéficos nas propriedades físicas do solo são alguns dos fatores que limitam o uso de tais equipamentos. Nessa perspectiva, além do processo mecânico de rompimento do solo, a utilização de uma planta de cobertura na entressafra pode ser uma importante ferramenta na atenuação dos processos naturais e antrópicos de acomodação das partículas do solo. Dentre as espécies destinadas ao período hibernar, o azevém se destaca em função de sua maior tolerância ao excesso hídrico, elevada capacidade de produção de massa seca e utilização diversificada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos de manejos do solo e de mecanismos de deposição do fertilizante de uma semeadora-adubadora sobre o consumo energético do trator, parâmetros físicos do solo e desempenho agrônômico da soja em terras baixas, assim como quantificar o potencial do azevém na atenuação dos processos de acomodação das partículas do solo.

1.2.2 Objetivos específicos

Mensurar o efeito de manejos mecânicos do solo e de mecanismos da semeadora sobre a qualidade da distribuição de sementes e o estabelecimento inicial de plantas de soja em um Planossolo Háplico

Determinar o consumo energético da descompactação e a eficiência de manejos mecânicos e uso de azevém na atenuação de problemas de ordem física do solo para o cultivo da soja em terras baixas

Avaliar manejos do solo, cultivo de azevém e uso de mecanismos de deposição do fertilizante na semeadora-adubadora sobre o desenvolvimento da soja em área de terras baixas.

2 ARTIGO I

MANEJOS DO SOLO E MECANISMOS SULCADORES DA SEMEADORA NO ESTABELECIMENTO DE SOJA EM UM PLANOSSOLO

SOIL MANAGEMENT AND SEEDER FURROW MECHANISMS IN THE ESTABLISHMENT OF SOYBEAN IN AN ALFISOL

2.1 RESUMO

O estabelecimento de plantas é um dos principais parâmetros a ser observado na busca por elevadas produtividades de grãos na cultura da soja. Todavia, em terras baixas, a obtenção de um estande de plantas adequado tem sido um desafio para técnicos e produtores. Nesse sentido, o estudo teve como objetivo verificar o efeito de manejos mecânicos do solo e de mecanismos sulcadores da semeadora sobre a qualidade da distribuição de sementes e o estabelecimento inicial de plantas de soja em um Planossolo Háplico. Para isso, foi instalado a campo um experimento na área de terras baixas da Universidade Federal de Santa Maria. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições e seis tratamentos, sendo eles: (A1) sem preparo do solo (SPS)+disco duplo na semeadora (DD); (A2) SPS+haste sulcadora (HS) desencontrada na semeadora; (A3) SPS+HS+mecanismo de acomodação do solo (MAS); (A4) escarificado+DD; (A5) grade aradora+DD e (A6) subsolado+DD. A disposição longitudinal de sementes não é afetada pelos manejos do solo nem pelos mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora. Por outro lado, o uso do MAS associado a HS viabiliza maior uniformidade na distribuição de sementes em profundidade. Para o estabelecimento inicial de plantas, os manejos com escarificação e subsolagem do solo, bem como o uso da HS associada ou não ao MAS na semeadora proporcionam menor morte de sementes e plântulas e, por consequência, viabilizam um melhor estabelecimento da soja em área de terras baixas com camada compactada.

Palavras-chave: Terras baixas. Plantabilidade. Morte de plantas. *Glycine max* (L.) Merrill.

2.2 ABSTRACT

The establishment of plants is one of the main parameters to be observed in the search for high grain yields in the soybean crop. However, in lowlands, obtaining an appropriate plant stand has been a challenge for technicians and producers. The study aimed to verify the

effect of mechanical soil management and seed furrow mechanisms on the seed distribution quality and the initial establishment of soybean plants in an Albuquarf. For this, an experiment was installed in the field in the lowland area of the Federal University of Santa Maria. The experimental design used was randomized blocks with four replications and six treatments, as follows: (A1) no soil preparation (NSP)+double disc (DD); (A2) NSP+chisel (CH) not aligned; (A3) NSP+CH+soil accommodation mechanism (SAM); (A4) scarified+DD; (A5) disc harrow+DD and (A6) chisel tillage+DD. The longitudinal arrangement of seeds is not affected nor by soil management neither by the fertilizer deposition mechanisms of the seeder-fertilizer. On the other hand, the use of SAM associated with CH enables greater uniformity in the distribution of seeds in depth. For the initial establishment of plants, the managements with soil scarification and subsoiling, as well as the use of CH associated or not to the SAM in the seeder, provide less seeds and seedlings death and, consequently, enable a better establishment of soybeans in a lowland area with compacted layer.

Keywords: Lowlands. Plantability. Plant death. *Glycine max* (L.) Merrill.

2.3 INTRODUÇÃO

A presença de plantas daninhas resistentes é um dos principais fatores restritivos a produção e de elevação dos custos da lavoura orizícola no sul do Brasil (RIBAS et al., 2021). Nesse contexto, a utilização da soja em sistema de rotação de culturas com o arroz irrigado tem sido uma importante ferramenta no controle dessas plantas, com destaque para o arroz vermelho (*Oryza sativa* L.) resistente aos herbicidas inibidores da Acetolactato Sintase (ALS).

Contudo, nas áreas de terras baixas do Rio Grande do Sul, as propriedades físicas dos solos que viabilizam a irrigação do arroz por inundação são as mesmas que predisõem as plantas de soja a períodos de estresse hídrico, seja ele por falta ou por excesso de água no solo. Dentre tais características, pode-se destacar a presença de uma camada com alto grau de compactação próximo à superfície do solo, a qual apresenta elevada resistência à penetração mecânica (COELHO et al., 2020), reduzida macroporosidade e baixa condutividade hidráulica da água (GUBIANI et al., 2018).

Nesse contexto, tem-se buscado alternativas de manejo que contribuam para a mitigação de estresses às plantas e que ao mesmo tempo acarretem em baixo impacto sobre o custo de produção, assim como sobre a operacionalidade do processo de implantação da cultura. O uso de manejos mecânicos de solo durante a entressafra (período de outono-

inverno), bem como de mecanismos de deposição do fertilizante acoplados a semeadora-adubadora tem sido reportados como eficientes para o cultivo de soja e milho em terras baixas (SARTORI et al., 2015; GIACOMELI et al., 2016).

No entanto, a mobilização do solo via intervenção mecânica é um dos parâmetros que podem impactar na qualidade de distribuição de sementes e, por consequência prejudicar o estabelecimento inicial das plantas. Nesse sentido, Cunha (2018) destaca que um estande de plantas compatível com as exigências da cultivar é o primeiro parâmetro a ser observado na busca por altos tetos produtivos na cultura da soja. Desse modo, a semeadora deve proporcionar uma distribuição espacial uniforme das sementes e ao mesmo tempo assegurar um bom contato das mesmas com solo, garantindo assim a rápida absorção da água necessária para que o processo germinativo se inicie (MODOLO et al., 2008).

A distribuição vertical de sementes tem importância vital no estabelecimento rápido e uniforme da lavoura, o que é um desafio ainda mais árduo nas áreas de terras baixas. De acordo com Koakoski et al. (2007), quando as sementes são depositadas em profundidade excessiva o processo de emergência é lento e há maior gasto de energia para o alongamento das estruturas de parte aérea, além das mesmas ficarem mais propensas ao ataque de patógenos e pragas. Por outro lado, aquelas depositadas superficialmente podem não conseguir absorver o volume de água necessário para completar o processo germinativo, que para a soja é de aproximadamente 50% de sua massa.

Já a desuniformidade na distribuição longitudinal, ou seja, no espaçamento entre sementes, dentre outros fatores implica no aproveitamento ineficiente dos recursos naturais disponíveis, tais como luz, água e nutrientes (JASPER et al., 2011). Como consequência, dependendo da cultivar e, fundamentalmente, do número de espaçamentos duplos e falhos, pode haver prejuízos na produtividade da cultura (FISS et al., 2018).

Nesse contexto, se espera diferenças significativas na qualidade de distribuição de sementes quando se utiliza distintos sistemas de abertura de sulcos. Em trabalho realizado por Vizzotto (2014), o uso da haste sulcadora a 0,18 m de profundidade ocasionou maior volume de solo mobilizado na linha de semeadura quando comparado ao disco duplo e ao disco turbo, resultando em um leito mais desuniforme para a deposição das sementes. Gimenez e Cortinove (2020) citam ainda que além da maior profundidade média na distribuição das sementes, a haste sulcadora resulta no acréscimo do número de espaçamentos falhos, gerando assim uma lavoura mais desuniforme.

Ademais, manejos mecânicos que promovam a desestruturação física do solo em superfície também tendem a prejudicar a qualidade de distribuição de sementes. Para Filho et

al. (2007), equipamentos como arado, grade aradora e até mesmo escarificadores devido ao elevado volume de solo mobilizado podem ocasionar o aumento do empolamento da superfície (rugosidade), deste modo, dependendo do intervalo de tempo, das condições de precipitação e do tipo de solo pode haver prejuízo na qualidade de distribuição das sementes.

No contexto apresentado, o estudo teve como objetivo verificar o efeito de manejos mecânicos do solo e de mecanismos sulcadores da semeadora sobre a qualidade da distribuição de sementes e o estabelecimento inicial de plantas de soja em um Planossolo Háplico.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido a campo durante a safra agrícola 2019/20, na área didático-experimental de terras baixas do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O clima da região enquadra-se na classe “Cfa”, subtropical úmido, com precipitação pluviométrica média de 1.616 mm ao ano (ALVARES et al., 2013).

O solo do local é classificado como Planossolo Háplico Alumínico gleissólico, pertencente à unidade de mapeamento Vacacaí (EMBRAPA, 2013) e apresenta as seguintes características físico-hídricas: teor de argila= 220 g g⁻¹, silte= 490 g g⁻¹, areia= 290 g g⁻¹ e capacidade de campo= 0,34 m³ m⁻³ na camada de 0 a 0,1 m de profundidade. A resistência à penetração mecânica da área era de 0,8; 2,1; 2,3; 1,9; 1,7 e 1,6 MPa nas camadas de 0 a 0,05; 0,05 a 0,1; 0,1 a 0,15; 0,15 a 0,2; 0,2 a 0,25 e 0,25 a 0,3 m de profundidade, respectivamente. Já a macroporosidade era de 0,09, 0,06 e 0,05 m³ m⁻³ nas camadas de 0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,3 m e profundidade, respectivamente. O local de instalação do experimento continha ainda pequena massa seca remanescente de arroz e azevém no momento da semeadura, aproximadamente 550 kg ha⁻¹ nos tratamentos sem manejo do solo na entressafra

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por manejos do solo durante a entressafra e mecanismos de deposição do fertilizante acoplados a semeadora-adubadora, sendo eles: (A1) sem preparo do solo (SPS)+disco duplo na semeadora (DD); (A2) SPS+haste sulcadora (HS) desencontrada na semeadora; (A3) SPS+HS+mecanismo de acomodação do solo (MAS); (A4) escarificado+DD; (A5) grade aradora+DD e (A6) subsolado+DD. O disco duplo nos tratamentos A1, A4, A5 e A6 trabalhou na profundidade média de 0,08 m, a HS+MAS a 0,20 m e a HS desencontrada a 0,23 m.

Os manejos de solo na entressafra foram implantados no dia 28 de setembro de 2019. A escarificação (Ripper Industrial São José Ltda.) foi realizada a profundidade de 0,35 m, com hastes espaçadas a 0,3 m. Já o subsolador (Terrus DSR da GTS do Brasil) atuou a 0,39 m, em um espaçamento entre hastes de 0,6 m. A grade aradora (Tatu Marchesan) operou na profundidade média de 0,12 m (ANEXOS C, F e G).

O MAS foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado e Uso Alternativo de Áreas de Várzea (GPAI) da UFSM. O mecanismo tem como objetivo melhorar a qualidade de distribuição das sementes quando associada à HS na deposição do fertilizante. O equipamento é composto por dois discos em forma de roseta alocados imediatamente atrás da HS, os quais tem como função trazer o solo deslocado pelo mecanismo sulcador novamente para a linha de cultivo. Na sequência, possui uma roda compactadora lisa, a qual desempenha a tarefa de reacomodar o solo na linha de semeadura e assim eliminar “galerias” deixadas pela HS (Figura 2).

O experimento foi semeado no dia 19 de novembro de 2019 com a cultivar DM 66i68 IPRO, de tipo de crescimento indeterminado e ciclo médio. A densidade de semeadura foi de 28,6 sementes m², sendo as mesmas tratadas com 50 g de Fipronil, 45 g de Tiofanato Metílico e 5 g de Piraclostrobina por 100 kg de sementes. As mesmas apresentavam ainda vigor e germinação de 89 e 94%, respectivamente. A adubação de base foi constituída de 18 kg ha⁻¹ de N, 72 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 72 kg ha⁻¹ de K₂O, 18 kg ha⁻¹ de Ca²⁺ e 18 kg ha⁻¹ de SO₄²⁻.

Para a semeadura foi utilizada uma semeadora-adubadora pantográfica MF 407 Plus da marca Massey Ferguson, composta de seis linhas espaçadas em 0,5 m e massa aproximada de 2.300 kg. No corte da palha foi utilizado um disco liso de 0,47 m de diâmetro e dosadores de semente do tipo disco alveolado horizontal com 90 alvéolos de 8 mm de diâmetro. A semeadora foi tracionada por um trator agrícola Massey Ferguson 6711. A velocidade de deslocamento do conjunto mecanizado durante a semeadura foi de 3,8 km h⁻¹ para o tratamento com HS desencontrada, 4,2 km h⁻¹ para HS+MAS e de 4,8 km h⁻¹ para os que utilizaram o disco duplo na deposição do fertilizante.

Para determinação das variáveis analisadas foi realizada a abertura de uma trincheira de quatro metros lineares na terceira linha de semeadura de cada unidade experimental (ANEXO I). Com o auxílio de uma régua graduada foi mensurada a profundidade e a distância de deposição entre as sementes. Para a análise de distribuição longitudinal, utilizou-se a metodologia descrita por Kurachi et al. (1989), onde valores menores que 0,5 vezes o valor de referência foram considerados espaçamentos duplos, maior que 1,5 vezes espaçamentos falhos e os compreendidos entre 0,5 e 1,5 vezes como espaçamentos aceitáveis.

O desvio padrão para distribuição vertical foi calculado por meio da variação observada entre as sementes da avaliação anterior. O índice de velocidade de emergência (IVE) foi mensurado por meio da contagem diária das plântulas emergidas em dois m² previamente demarcados na segunda linha de semeadura, seguindo a metodologia proposta por Maguire (1962).

O desvio padrão entre plantas foi determinado através da medição da distância entre as plantas estabelecidas, sendo realizada na mesma área utilizada para a determinação do IVE. A avaliação ocorreu aos 39 dias após a semeadura da soja. Na mesma área e data foi quantificado o número de plantas mortas. Os dados de precipitação foram obtidos por meio da estação meteorológica automática do 8º DISME/INMET localizado no Departamento de Fitotecnia da UFSM, a aproximadamente 600 m do local de instalação do experimento.

Os dados obtidos foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático. A análise da variância foi realizada através do teste F, sendo as médias, quando significativas, agrupadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os manejos do solo na entressafra e os mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora não influenciaram os parâmetros relacionados à distribuição longitudinal de sementes, sendo verificados valores médios de 13,2, 72,3 e 14,5% de sementes duplas, aceitáveis e falhas, respectivamente. De acordo com a classificação proposta por Tourino & Klingensteiner (1983), a qualidade de distribuição de sementes obtida no experimento enquadra-se na classe “regular”, ou seja, apresenta entre 50 e 75% de espaçamentos aceitáveis. Em trabalho conduzido com a cultura do milho por Trogello et al. (2013), onde foram testados mecanismos da semeadora (HS e DD), manejos da palhada de aveia preta (dessecada, rolada, triturada e gradeada) e velocidades de semeadura, verificou-se diferença significativa apenas para a última variável citada. Nesse contexto, Bottega et al. (2018) citam que o aumento da velocidade de semeadura de 6 para 8 km h⁻¹ resultou no incremento de 200 e 295% no número de espaçamentos falhos e duplos com o uso do disco horizontal respectivamente. Já para o sistema pneumático, os acréscimos foram menores.

Para a distribuição vertical (Tabela 1), se observa que o desvio padrão da profundidade de deposição entre as sementes foi 57% inferior quando se utilizou o MAS associado a HS em relação à média dos demais tratamentos. Como consequência da menor dispersão entre os valores, o MAS proporcionou menor amplitude na profundidade de deposição das sementes no leito de semeadura, com valor mínimo de 2,7 e máximo de 5,5 cm. Enquanto para os

tratamentos SPS+HS desencontrada e escarificado+DD, a variação na profundidade das sementes foi de 2 e 1,5 cm para profundidade mínima e 10,8 e 7,5 cm para a máxima, respectivamente.

Nessa perspectiva, Levien et al. (2011) destacam que o tipo de mecanismo sulcador utilizado influencia diretamente no volume de solo mobilizado na linha de semeadura, podendo variar de $57 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para o DD a mais de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ na HS. Logo, a homogeneidade na deposição de sementes poderá variar. No entanto, apesar da HS resultar em maior mobilização do solo antes da passagem do mecanismo dosador de sementes, a associação com MAS foi eficiente em reestruturar o solo na linha de cultivo (ANEXO H), eliminando galerias onde sementes são comumente depositadas em profundidades excessivas com esse tipo de mecanismo, bem como resultou em um leito menos heterogêneo para a deposição das mesmas (ANEXO I).

Quanto aos parâmetros relacionados ao estabelecimento inicial de plantas (Tabela 2), pode-se verificar que os tratamentos SPS+DD e grade aradora+DD foram estatisticamente inferiores aos demais, resultando em um menor índice de velocidade de emergência (13,1 e 19, respectivamente), menor porcentagem de estabelecimento (44,6 e 56,7%, respectivamente) e estande inicial de plantas (12,7 e 17,1 plantas m^{-2} , respectivamente). De acordo com Vizzotto (2014), para que haja um adequado estabelecimento da soja em terras baixas três aspectos principais devem ser observados, sendo eles: a qualidade de distribuição vertical das sementes, os parâmetros físicos de solo em profundidade (estado de compactação) e a precipitação pluviométrica após a semeadura.

Dessa forma, os problemas de estabelecimento inicial nos referidos tratamentos podem ser atribuídos, em parte, à precipitação pluviométrica de 39,2 mm ocorrida nos dias que se seguiram à semeadura (Figura 1), a qual associada à manutenção da camada compactada em subsuperfície podem ter potencializado o período de tempo no qual sementes ficaram sujeitas à limitação de oxigênio (ANEXO H). Em detrimento a isso, Taiz et al. (2017) destacam que a fase de germinação é o período de maior sensibilidade das culturas a deficiência de oxigênio, podendo a mesma causar a inibição da respiração celular com consequências negativas nos processos de desdobramento das reservas das sementes em ATP (Adenosina Trifosfato), o que prejudica a formação de novos tecidos. Além disso, durante um processo de germinação prolongado, seja resultante do estresse hídrico (excesso ou falta de água), ou ainda da profundidade excessiva de semeadura, as sementes ficam mais propensas ao ataque de fungos patogênicos e de pragas, bem como da possibilidade de selamento superficial decorrente de precipitações elevadas (GOULART, 2016).

Outro empecilho ao estabelecimento das lavouras de soja no ambiente de terras baixas tem sido a morte de plantas, principalmente por fungos de solo. No presente estudo, constatou-se que a utilização do DD sem preparo prévio do solo e da gradagem do solo+DD favoreceu o aumento da porcentagem de plantas mortas, com valores de 19,2 e 12,5%, respectivamente. De acordo Reis et al. (2014), os principais patógenos causadores de tombamento na soja são os fungos do gênero *Phytophthora* e *Fusarium*, os quais são favorecidos por condições de solo compactado associado a períodos prolongados de excesso hídrico, fatores esses observados em ambos os tratamentos acima citados.

Por outro lado, quando se utilizou manejos do solo e/ou mecanismos da semeadora que possibilitassem o rompimento da camada do solo com maior resistência à penetração mecânica (0,1 a 0,2 m de profundidade), a porcentagem de morte de plantas diminuiu para 5,2% (Tabela 2). Isso representa uma redução de aproximadamente 17.000 plantas mortas por hectare, se comparada a média dos tratamentos SPS+DD e grade aradora+DD. Esses resultados podem ser explicados pela atenuação dos problemas de ordem física do solo. Segundo Sartori et al. (2015), o uso da HS na deposição do fertilizante, bem como da escarificação viabilizam o incremento da taxa de infiltração de água no perfil do solo quando comparado ao DD e ao disco turbo, resultando em menor período de tempo de saturação do solo nas camadas superficiais após precipitações.

Outro fato a ser destacado é que apesar de não se observar diferenças estatísticas para os parâmetros de distribuição longitudinal de sementes (falhas, aceitáveis e duplas), os manejos de solo e dos mecanismos da semeadora resultaram em diferenças na distribuição de plantas na área, aqui representado pelo desvio padrão. Conforme descrito na Tabela 2, o manejo SPS+DD, seguido da grade aradora+DD foram os que apresentaram maior desvio padrão entre plantas, o que possibilita afirmar que esses tratamentos apresentam uma maior dispersão dos valores de distância entre as mesmas.

Tais diferenças podem ser atribuídas fundamentalmente a menor porcentagem de germinação (correlato a sementes que não conseguiram emergir) e a maior porcentagem de plantas mortas. No tratamento SPS+DD, o qual apresentou desvio padrão superior a todos os demais, a distância máxima observada entre plantas foi de 46,3 cm, já para a HS+MAS foi de apenas 25,1 cm.

Esse resultado possui um impacto direto na produtividade potencial da soja, visto que as plantas possuem plasticidade fenotípica limitada (TOYOTA et al., 2017; BALBINOT JR et al., 2018). De acordo com Cunha (2018), em situações onde o número adequado de plantas não é alcançado, recursos determinantes no sucesso da lavoura são desperdiçados (água, luz e

nutrientes). Em trabalho realizado pelo mesmo autor, é possível verificar que a retirada aleatória de 50% das plantas estabelecidas proporcionou o aumento do número de legumes por planta. Contudo, esse incremento não foi suficiente para compensar a perda no número das mesmas, o que resultou em redução na produtividade de grãos. Além disso, a redução de estande de plantas de soja em áreas de terras baixas traz consigo outro inconveniente, a possibilidade de multiplicação de plantas daninhas, com destaque para o arroz vermelho (*Oryza sativa* L.), cyperaceas (*Cyperus* spp.) e capim arroz (*Echinochloa* spp.). Ou seja, uma lavoura de soja mal estabelecida ao invés de auxiliar no controle dessas invasoras para o cultivo subsequente de arroz pode vir a agravar o problema.

2.6 CONCLUSÕES

O uso do mecanismo de acomodação associado à haste sulcadora em área sem mobilização previa do solo viabiliza melhor qualidade de distribuição das sementes em profundidade.

O rompimento da camada de maior limitação física do solo proporciona melhor estabelecimento inicial de plantas de soja em terras baixas.

2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C.A. et al G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

BALBINOT JR., A.A. et al. Phenotypic plasticity in a soybean cultivar with indeterminate growth type. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.9, p.1038-1044, 2018. DOI: 10.1590/S0100-204X2018000900007.

BOTTEGA, E.L. et al. Efeitos da profundidade e velocidade de semeadura na implantação da cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v.19, n.2, p.74-78, 2014. DOI: 10.12661/pap.2014.011.

COELHO, L.L. et al. Seeding furrow opening mechanisms and the soybean planting in lowland areas. **Ciência Rural**, v.50, e20190870, 2020. DOI: 10.1590/0103-8478cr20190870.

CUNHA, V.S. **Aspectos agronômicos e econômicos da distribuição de plantas na cultura da soja**. Santa Maria, 2018. 97f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2018.

- FILHO, A.C. et al. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.1, p.229-237, 2007. DOI: 10.1590/S0100-69162007000100017.
- FISS, G. et al. Yield and agronomic characteristics of soybean regarding sowing failure. **Revista de Ciências Agrárias**, v.61, p.1-7, 2018. DOI: 10.22491/rca.2018.2477.
- GIACOMELI, R. et al. Escarificação do solo e sulcadores em semeadora para cultivo de milho em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.3, p.261-270, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000300008.
- GIMENEZ, L.M.; CORTINOVE, L. Mecanismos sulcadores afetam a qualidade de semeadura de soja. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.6, p.37706-37712, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n6-343.
- GOULART, R.Z. **Manejo do solo de várzea para o cultivo de soja, milho e forrageiras hibernais na Fronteira Oeste Gaúcha**. Santa Maria, 2016, 82f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo)-Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria-RS, 2016.
- GUBIANI, P.I. et al. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.42, e0170282, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbcS20170282.
- JASPER, R. et al. Velocidade de semeadura da soja. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.1, p.102-110, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000100010.
- KOAKOSKI, A. et al. Desempenho de semeadora-adubadora utilizando-se dois mecanismos rompedores e três pressões da roda compactadora. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.5, p.725-731, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007000500016.
- KURACHI, S.A.H. et al. Avaliação tecnológica de semeadoras e/ou adubadoras: tratamento de dados de ensaios e regularidade de distribuição longitudinal de sementes. **Bragantia**, v.48, n.2, p.249-262, 1989, 2017. DOI: 10.1590/S0006-87051989000200011.
- LEVIN, 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**, v.41, n.6, p.1003-1010, 2011. DOI: 10.1590/S0103-84782011000600014.
- MAGUIRE, J.D. Speed of germination - aid in selection aid evolution for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v.2, n.2, p.176-177, 1962. DOI: 10.2135/cropsci1962.011183X00020002033x.
- MODOLO, A.J. et al. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.4, p.1259-1265, 2008. DOI: 10.1590/S1413-70542008000400034.
- REIS, E.M. et al. Effects of crop rotation on root rot incidence and on soybean grain yield. **Summa Phytopathol**, v.40, n.1, p.9-15, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832006000500003.

RIBAS, G.G. et al. Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. **Agricultural Systems**, v.188, 103036, 2021. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103036.

SARTORI, G.M.S. et al. Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.12, p.1139-1149, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015001200003.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TOURINO, M.C.C.; KLINGENSTEINER, P. Ensaio e avaliação de semeadoras-adubadoras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 13. 1983, Seropédica, 1983. **Anais**. Seropédica: SBEA, 1983, p.103-107.

TOYOTA, M. et al. Changes in radiation interception and R:FR over time and with canopy depth of two soybean cultivars different branching characteristics. **Plant Production Science**, v.20, p.205-214, 2017. DOI: 10.1080/1343943X.2017.1294464.

TROGELLO, E. et al. Efeitos da profundidade e velocidade de semeadura na implantação da cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v.19, n.2, p.74-78, 2013. DOI: 10.12661/pap.2014.01.

VIZZOTTO, V.R. **Desempenho de mecanismos sulcadores em semeadora-adubadora sobre os atributos físicos do solo em várzea no comportamento da cultura da soja (*Glycine max* L.)**. Santa Maria, 2014. 79f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2014.

Tabela 1 - Distribuição longitudinal (duplas, aceitáveis e falhas) e vertical (desvio padrão, profundidade média e variação na profundidade) de sementes em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.

Tratamentos	Distribuição longitudinal		
	Duplas	Aceitáveis	Falhas
	-----%-----		
SPS + disco duplo (DD)	13,3 ^{ns}	71,8 ^{ns}	14,9 ^{ns}
SPS + HS desencontrada	15,3	67,7	17,0
SPS + HS + MAS	13,0	74,2	12,8
Escarificado (Ripper) + DD	10,2	77,6	12,2
Grade aradora + DD	9,4	75,6	15,0
Subsolado (Terrus) + DD	17,8	67,0	15,2
Média	13,2	72,3	14,5
CV (%)	31,6	15,4	33,9

Tratamentos	Distribuição vertical		
	Desvio Padrão	Prof. média (cm)	Variação de prof. (cm)
SPS + disco duplo (DD)	0,96 a ⁽¹⁾	4,17 ^{ns}	2,2 a 7 (±4,8)
SPS + HS desencontrada	1,07 a	4,34	2 a 10,8 (±8,8)
SPS + HS + MAS	0,57 b	3,89	2,7 a 5,5 (±2,8)
Escarificado (Ripper) + DD	0,83 a	3,90	1,5 a 7,5 (±6,0)
Grade aradora + DD	0,88 a	3,97	1,8 a 7 (±5,2)
Subsolado (Terrus) + DD	0,74 a	3,85	2,5 a 7,5 (±5,0)
Média	0,84	4,0	-
CV (%)	22,2	13,9	-

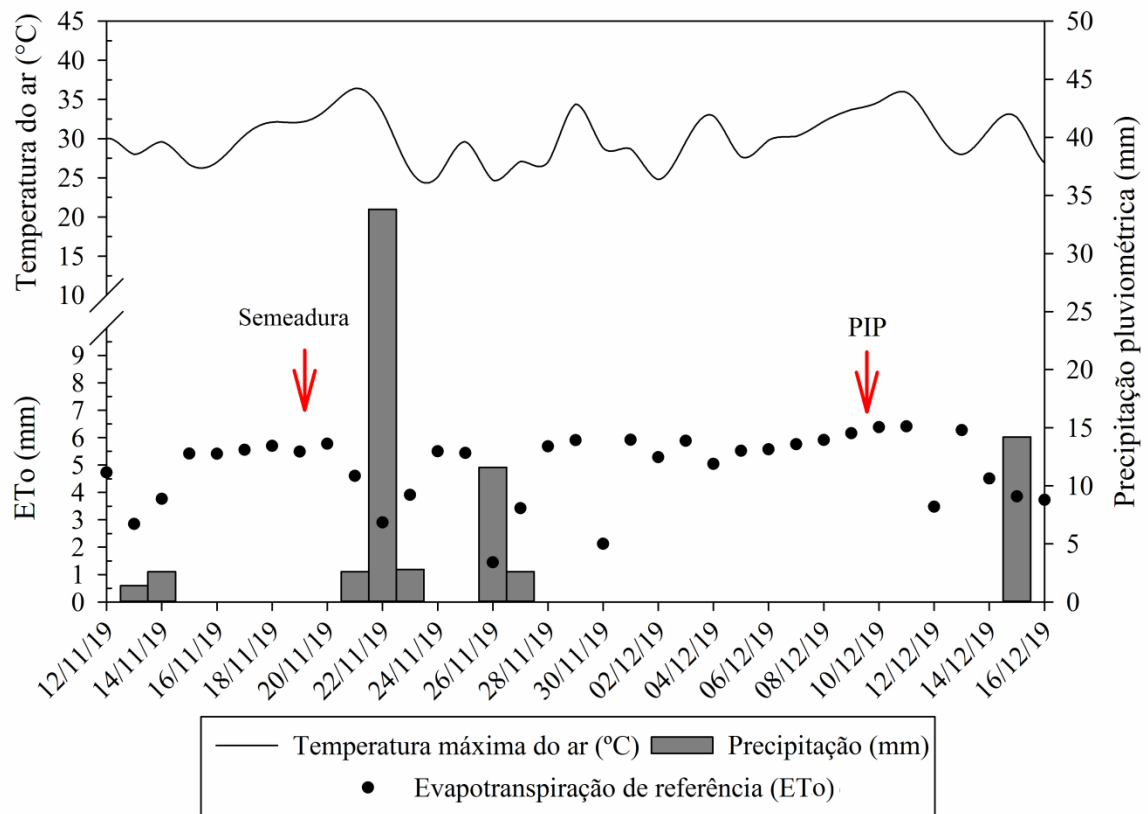
⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). ^{ns} Não significativo a nível de 5% de probabilidade do erro. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo.

Tabela 2 - Índice de velocidade de emergência (IVE), plantas mortas, porcentagem de estabelecimento, população inicial (PIP) e distribuição longitudinal de plantas [desvio padrão (DP) e distância mínima, média e máxima] em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.

Tratamentos	IVE	Plantas mortas (%)	Est. de plantas (%)	PIP (plantas m ⁻²)
SPS + disco duplo (DD)	13,1 c ⁽¹⁾	19,2 a	44,6 c	12,7 c
SPS + HS desencontrada	21,1 b	3,6 c	73,1 a	20,9 a
SPS + HS + MAS	24,3 a	3,8 c	77,2 a	22,1 a
Escarificado (Ripper) + DD	22,5 a	5,3 c	70,5 a	20,2 a
Grade aradora + DD	19,0 b	12,5 b	56,7 b	17,1 b
Subsolado (Terrus) + DD	20,9 b	8,2 c	69,2 a	19,7 a
Média	20,2	8,8	65,2	18,8
CV (%)	12,0	49,0	13,2	13,0
Tratamentos	DP distância	D. mínima (cm)	D. média (cm)	D. máxima (cm)
SPS + disco duplo (DD)	12,2 a	0,33 ^{ns}	15,6 a	46,3 a
SPS + HS desencontrada	6,9 c	0,43	9,6 c	28,3 b
SPS + HS + MAS	5,3 c	0,63	9,0 c	25,1 b
Escarificado (Ripper) + DD	6,3 c	0,55	9,6 c	27,3 b
Grade aradora + DD	9,2 b	0,60	11,4 b	44,2 a
Subsolado (Terrus) + DD	7,3 c	0,58	11,1 b	37,3 a
Média	7,85	0,52	11,0	34,8
CV (%)	20,6	78,9	14,6	23,5

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). ^{ns} Não significativo a nível de 5% de probabilidade do erro. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo. DP: desvio padrão.

Figura 1 - Precipitação pluviométrica, temperatura máxima do ar e evapotranspiração de referência (ETo) na área experimental de terras baixas da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) durante o período de semeadura e estabelecimento inicial das plantas de soja na safra agrícola 2019/20. Santa Maria, RS. 2021. PIP*: população inicial de plantas.



Fonte: Autor.

Figura 2 - Detalhe do mecanismo de acomodação do solo desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado e Uso Alternativo de Áreas de Várzea (GPAI) da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2021



Fonte: Autor.

3 ARTIGO II

PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO, CONSUMO ENERGÉTICO DA DESCOMPACTAÇÃO E USO DE AZEVÉM EM UM PLANOSSOLO PARA O CULTIVO DE SOJA

SOIL PHYSICAL PROPERTIES, DECOMPACTATION ENERGY CONSUMPTION AND USE OF RYEGRASS IN A ALFISOL FOR SOYBEAN CULTIVATION

3.1 RESUMO

O estudo teve como objetivo determinar o consumo energético da descompactação e a eficiência de manejos mecânicos e uso de azevém na atenuação de problemas de ordem física do solo para o cultivo da soja em terras baixas. O experimento foi instalado no delineamento de blocos ao acaso, em um bifatorial 6x2. Os níveis do fator A foram implantados na safra 2019/20, sendo compostos por manejos do solo na entressafra e mecanismos de deposição do fertilizante de uma semeadora-adubadora: (A1) sem preparo do solo (SPS)+disco duplo na semeadora (DD); (A2) SPS+haste sulcadora (HS) desencontrada; (A3) SPS+HS+mecanismo de acomodação do solo (MAS); (A4) escarificado+DD; (A5) grade aradora+DD e (A6) subsolado+DD. O fator D foi estabelecido previamente à colheita da soja no primeiro ano de estudo, sendo composto pelo cultivo do azevém na entressafra (D1) e pousio da área (D2). Na safra 2020/21 foi adicionado o tratamento Escarificado em 2020+DD. Entre os manejos de entressafra, a escarificação apresentou maior consumo de combustível ($28,1 \text{ L ha}^{-1}$) e menor capacidade operacional ($1,06 \text{ ha h}^{-1}$). Já na semeadura, o uso da HS resultou no aumento da demanda de potência no trator quando comparado aos tratamentos com DD na deposição do fertilizante. Em contrapartida, viabilizou a redução da resistência à penetração (RP) e o aumento da macroporosidade do solo na camada de 0,1 a 0,2 m de profundidade na linha de cultivo. No manejo com escarificação esses resultados também foram observados na entrelinha de semeadura, resultando em maior exploração do perfil do solo pelo sistema radicular das plantas. Parte das melhorias oriundas da escarificação do solo é perceptível por pelo menos 15 meses após a intervenção mecânica (RP e macroporosidade), independentemente do cultivo ou não do azevém na entressafra. A produtividade de grãos está associada à capacidade de cada um dos manejos em atenuar as restrições de ordem física do solo.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill. Escarificação do solo. Demanda de tração. Terras baixas.

3.2 ABSTRACT

The study aimed to determine the energy consumption of decompaction and the efficiency of mechanical management and italian ryegrass use in attenuating soil physical problems for soybean cultivation in lowland areas. The experiment was conducted in a randomized block design, in a 6x2 bifactorial. The levels of factor A were implemented in the 2019/20 growing season, being composed by soil managements in the off-season, and by fertilizer deposition mechanisms of a seeder-fertilizer: (A1) no soil preparation (NSP)+double disc (DD); (A2) NSP+chisel (CH) not aligned; (A3) NSP+CH+soil accommodation mechanism (SAM); (A4) scarified+DD; (A5) disc harrow+DD and (A6) chisel tillage+DD. Factor D was implemented previously to the soybean harvest in the first year of the study, consisting of Italian ryegrass cultivation in the off-season (D1) and fallow (D2). At the 2020/21 growing-season, the treatment Scarified in 2020 + DD was added. Between the managements in the off-season, soil scarification showed higher fuel consumption (28.1 L ha^{-1}) and lower operational capacity (1.06 L ha^{-1}). At sowing, CH use resulted in increasing of energy demand, when compared to the treatments with DD in the fertilizer deposition. On the other hand, promoted reduction in penetration resistance (RP) and the increase of soil macroporosity (MA) in the 0.1 to 0.2 m depth layer in the crop row. At the management with scarification, these results were also observed between the crop rows, resulting in greater exploration of the soil profile by the root system of the plants. Part of the improvements from soil scarification is noticeable for at least 15 months after mechanical intervention (RP and microporosity), regardless the cultivation or not of italian ryegrass during the off-season. Grain yield is associated with the ability of each of the managements to attenuate the soil physical restrictions.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill. Soil scarification. Draft requirement. Lowland areas.

3.3 INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul (RS) se destaca como o maior produtor brasileiro de arroz, respondendo por aproximadamente 70% da produção nacional (CONAB, 2021). No Estado o grão é produzido em 129 municípios, sendo o responsável pelo sustento direto e/ou indireto

de mais de 230 mil pessoas (SOSBAI, 2018). Apesar das produtividades recordes obtidas na safra agrícola 2019/20, muitas das áreas de cultivo vêm sofrendo com a perda de rentabilidade ao longo dos anos.

Em parte das propriedades do Estado, o modelo de utilização das áreas é um dos fatores que limita a sustentabilidade econômica do sistema de produção, uma vez que está alicerçado no monocultivo do arroz irrigado associado à pecuária de corte extensiva, em um sistema muitas vezes não integrado (CARVALHO et al., 2013). Como consequência, tem-se a subutilização das áreas, o surgimento de plantas daninhas resistentes a herbicidas e a dependência financeira baseada em uma única atividade agrícola, a comercialização de grãos de arroz.

Na busca por um uso mais intensivo das áreas de terras baixas, a semeadura da soja em rotação com o arroz irrigado vem despontando como uma importante alternativa para a metade Sul do RS (RIBAS et al., 2021), ocupando na safra 2020/21 cerca de 1/3 da área destinada à produção orizícola no Estado. Contudo, cabe salientar que apesar do aumento expressivo em área, a produtividade de grãos da leguminosa nesse ambiente ainda é baixa, com patamares médios compreendidos entre 2.000 e 3.000 kg ha⁻¹ (IRGA, 2021).

Os atributos intrínsecos dos solos têm sido apontados como um dos principais gargalos na expressão do potencial produtivo da soja nesse ambiente. Conforme Gomes et al. (2006), os solos cultivados com arroz irrigado naturalmente apresentam condições físicas desfavoráveis para as culturas ditas de “sequeiro”, pois em sua maioria possuem topografia plana, elevada relação micro/macroporos, horizontes superficiais eluviais e transição abrupta com um horizonte Bt argiloso e adensado.

Segundo Ribeiro et al. (2016), os problemas referentes a estrutura física desses solos são ainda agravados pelo intenso tráfego de máquinas agrícolas durante o preparo das áreas para o cultivo do arroz, onde frequentemente as operações ocorrem sob condições de umidade de solo inadequada. Como resultado, muitas das áreas inseridas no modelo orizícola de produção possuem uma camada com elevado grau de compactação próximo à superfície do solo, as quais dentre outras características apresentam reduzida permeabilidade ao ar (GUBIANI et al., 2018), quebra da continuidade e redução do tamanho dos poros e elevada resistência à penetração mecânica (SORACCO et al., 2015).

Em resposta às alterações na estrutura porosa do solo, há uma maior concentração de raízes da soja na camada superficial, entre 0 e 0,1 m de profundidade, limitando o volume de água e nutrientes explorados pelas plantas (SARTORI et al., 2016). No outro extremo, a elevada relação micro/macroporos dificulta a drenagem da água oriunda de precipitações,

podendo resultar em maiores períodos de estresse hídrico por deficiência de oxigênio no perfil do solo.

Nesse contexto, o rompimento da camada de maior limitação física é crucial na busca por um cultivo de soja mais estável nessas áreas. A utilização da haste sulcadora associada à semeadora-adubadora tem sido reportada como uma alternativa eficiente na melhoria dos atributos físicos do solo na linha de cultivo, proporcionando acréscimo na massa seca de raízes, na fixação biológica de nitrogênio e na produtividade de grãos quando comparado ao disco duplo (COELHO et al., 2020). Em contra partida, o maior volume de solo mobilizado pode impactar na demanda energética do processo de semeadura (SANTOS et al., 2008, FRANCKETTO et al., 2016).

O uso de escarificadores (SARTORI et al., 2016; GUBIANI et al., 2018) e subsoladores (SUN et al., 2018) são outras alternativas na busca por melhorias no fluxo de água e ar no perfil do solo. Esses equipamentos se caracterizam pela maior profundidade de atuação, sendo sua eficiência dependente das particularidades do implemento e da umidade do solo no momento da operação (BELLÉ et al., 2014). O elevado custo energético e seu potencial efêmero na mitigação dos problemas oriundos da compactação são alguns dos fatores que podem restringir sua utilização (DRESCHER et al., 2016; NUNES et al., 2019).

Nessa perspectiva, plantas de cobertura podem ser utilizadas com o propósito de prolongar os benefícios advindos da intervenção mecânica do solo. Devido a sua tolerância ao excesso hídrico, o azevém (*Lolium multiflorum*) surge como principal alternativa para cobertura dos solos de terras baixas durante o período de outono-inverno. Além disso, a espécie possui ainda uma elevada capacidade de produção de raízes (MATOCHA et al., 2018), as quais podem auxiliar na estabilização dos agregados do solo via liberação de material orgânico para a rizosfera (TISDALL & OADES, 1979).

Em vista do exposto, o estudo teve como objetivo determinar o consumo energético da descompactação e a eficiência de manejos mecânicos e uso de azevém na atenuação de problemas de ordem física do solo para o cultivo da soja em terras baixas.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido a campo durante as safras agrícolas 2019/20 e 2020/21, na área experimental do Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado (GPAI) da Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil (29°43'11"S e 53°43'26"W). O clima da região segundo Köppen é Cfa, subtropical úmido, sem estação seca definida e com precipitação pluviométrica média de

1.616 mm anuais (ALVARES et al., 2013). O solo da área é classificado como Planossolo Háptico Alumínico gleissólico (SANTOS et al., 2018). A textura dos horizontes diagnósticos Ap (0 a 0,09 m), A (0,1 a 0,15 m), Ag1 (0,16 a 0,32 m), Ag2 (0,33 a 0,55 m) e Btg (0,56 a 1 m+) era, respectivamente: areia= 290, 330, 330, 270 e 150 g kg⁻¹; silte= 490, 430, 420, 470, 370 g kg⁻¹ e argila= 220, 240, 250, 250 e 490 g kg⁻¹. A área apresenta ainda capacidade de campo de 0,34 m³ m⁻³ e ponto de murcha permanente de 0,13 m³ m⁻³ (KLEIN et al., 2010) na camada de 0 a 0,3 m de profundidade.

O experimento foi instalado no delineamento de blocos ao acaso, em um fatorial 6x2 (AxD) com quatro repetições. Os níveis do fator A foram implantados na safra agrícola 2019/20, sendo composto por manejos do solo na entressafra e mecanismos de deposição do fertilizante de uma semeadora-adubadora, sendo eles: (A1) sem preparo do solo (SPS)+disco duplo (DD) na semeadora; (A2) SPS+haste sulcadora (HS) desencontrada na semeadora; (A3) SPS+HS+mecanismo de acomodação do solo (MAS); (A4) escarificado+DD; (A5) grade aradora+DD e (A6) subsolado+DD. O fator D foi implantado previamente à colheita da soja no primeiro ano de estudo, sendo composto pelo cultivo do azevém na entressafra (D1) e pousio da área (D2). Na safra 2020/21 foi adicionado o tratamento Escarificado em 2020+DD no Fator A, sendo a intervenção mecânica realizada no dia 24 de setembro de 2020. Os manejos com escarificação e subsolagem estabelecidos na safra 2019/20 não foram refeitos no segundo ano de experimento, transformando-se nos tratamentos Escarificado em 2019+DD (A4) e Subsolado em 2019+DD (A6), respectivamente. Os mecanismos da semeadora (HS e DD) foram utilizados nas duas safras agrícolas conforme estabelecido em cada tratamento.

A área do experimento foi cultivada na safra 2018/19 com arroz irrigado, o qual foi colhido em solo seco. No mês de abril foi realizada o rebaixamento da palhada do arroz com uma roçadeira tratorizada, após, foi aplicado em superfície 4 Ton. ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 65%). A área permaneceu com vegetação espontânea até a semeadura da soja.

Os manejos do solo na entressafra foram implantados no dia 28 de setembro de 2019. A escarificação foi realizada com um escarificador Ripper da Industrial São José, composto de 11 hastes espaçadas em 0,3 m, as quais trabalharam na profundidade média de 0,35 m. Para a subsolagem foi utilizado o subsolador Terrus DSR da GTS do Brasil, o equipamento era composto por seis hastes espaçadas em 0,6 m, as quais atuaram na profundidade média de 0,39 m. Já a gradagem foi realizada com uma grade aradora de 16 discos (28”) da marca Baldan, a profundidade de 0,12 m. O solo apresentava umidade volumétrica de 0,23, 0,27 e 0,31 m³ m⁻³ nas profundidades de 0 a 0,1, 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m, respectivamente. Para tracionar os implementos foi utilizado um trator Massey Ferguson, modelo 7719, com tração

dianteira auxiliar (TDA) e motor turbo intercooler AGCO Power de 6.600 cm³ gerando uma potência de 145 KW a 1.950 RPM (ANEXO C).

Para a semeadura da soja foi utilizada uma semeadora pantográfica da Massey Ferguson, modelo MF 407, composta de seis linhas espaçadas em 0,5 m e massa aproximada de 2.200 kg. A semeadora foi equipada com disco liso de 0,48 m de diâmetro para o corte da palha. Os discos duplos mediam 0,40 e 0,38 m de diâmetro e trabalharam a profundidade média de 0,08 m. As hastes sulcadoras possuíam 0,43 m de comprimento e ponteiros com largura de 21,3 mm. No tratamento SPS+HS desencontrada, a haste foi deslocada 0,05 m da linha de deposição das sementes e atuou a profundidade média de 0,23 m. Já no tratamento SPS+HS+MAS, a profundidade de atuação foi de aproximadamente 0,20 m. Para tracionar a semeadora foi utilizado um trator Massey Ferguson modelo MF 6711 com TDA, o qual contava com um motor turbo intercooler AGCO Power de 4 cilindros com 4.400 cm³, gerando uma potência máxima de 85 KW a 2.000 RPM (ANEXO C).

A semeadura da soja no primeiro ano de estudo ocorreu no dia 19 de novembro de 2019, com a cultivar DM 66i68 IPRO. Na segunda safra, foi utilizada a BS 2606 IPRO, sendo a mesma semeada em dois momentos distintos em função da umidade do solo. O primeiro no dia 02 de novembro para os tratamentos com pousio e o segundo no dia 11 de novembro de 2020 para os com cultivo de azevém na entressafra. A adubação e os demais tratamentos culturais foram realizados conforme as recomendações técnicas para a cultura (CARAFFA et al., 2018).

O azevém (Fator D) foi semeado a lanço quando a soja estava no estágio fenológico R7, no dia 30 de março de 2020, na quantidade de 40 kg de semente ha⁻¹. A adubação na entressafra foi realizada na forma de 45 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no início do perfilhamento das plantas. A cultura foi dessecada no dia 25 de agosto de 2021, 78 dias antes da semeadura da soja. A MS residual média do azevém no momento da semeadura da soja era de 4.317 kg ha⁻¹ e não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos.

Para a determinação dos parâmetros de mecanização foi instalada nos tratores (MF 7719 e MF 6711) uma instrumentação eletrônica desenvolvida por RUSSINI (2009) e ROSA (2019), sendo a mesma pertencente ao Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas (NEMA) da UFSM (ANEXO E). Os dados dos sensores foram coletados em um intervalo regular de um segundo entre medidas e armazenados em um datalogger Campbell Scientific, modelo CR 1000.

A força de tração demandada pelos equipamentos (escarificador, grade aradora, subsolador e semeadora) foi registrada através de pulsos elétricos gerados por uma célula de

carga com capacidade de 100 kN. Para o consumo de combustível, foi utilizado um fluxômetro da marca Flow Mate (Oval M-III), modelo LSF, o qual fornece um número de pulsos correspondente ao volume de combustível que passa pelo mesmo em um determinado espaço de tempo.

Para a quantificação da velocidade das rodas motrizes dos tratores foi acoplada a cada rodado uma engrenagem composta por 32 dentes. Em cada uma delas foi associado um sensor do tipo indutivo, o qual é capaz de quantificar a frequência com que os dentes da engrenagem passam pelo mesmo. Por fim, o patinamento foi obtido através da relação entre a velocidade real do trator, calculada pela relação distância-tempo e a velocidade das rodas motrizes, conforme proposto por Gabriel-Filho et al. (2004).

Aos 48 e 44 dias após a semeadura da soja (DASS), para as safras 2019/20 e 2020/21 respectivamente, foram realizadas as determinações referentes às propriedades físicas do solo: densidade (Ds), macroporosidade (MA) e porosidade total (PT). Para tal, foram coletadas amostras indeformadas nas camadas de 0 a 0,1, 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,3 m profundidade, na linha e entrelinha de semeadura na primeira safra agrícola e apenas na linha na segunda. A PT foi calculada através da relação entre a Ds e a densidade de partícula. A microporosidade (MI) foi determinada pelo conteúdo volumétrico de água na amostra submetida a uma tensão de 0,006 MPa (DONAGEMA et al., 2011), já a MA foi considerada como a diferença entre a PT e a MI.

A resistência mecânica à penetração do solo foi quantificada aos 62 DASS na safra 2019/20 e aos 57 DASS na safra 2020/21. Foi utilizado um penetrômetro digital da marca Falker, modelo PLG 1020. A profundidade de avaliação foi de 0,3 m, sendo as amostragens dispostas perpendicularmente à linha de semeadura da soja, duas na entrelinha, uma na linha, duas na entrelinha, uma na linha e mais duas na entrelinha.

No sistema radicular foi avaliada a distribuição das raízes da soja através do método do perfil vertical. Para isso, na safra 2019/20 foi aberto uma trincheira perpendicular a duas linhas de semeadura, sendo as raízes expostas com auxílio de água e varetas de metal em um quadro de 1,1x0,35 m, com quadrículas espaçadas 0,05x0,05 m.

A produtividade de grãos da soja foi determinada através da colheita manual de uma área de 8 m² por unidade experimental. Após a trilha, limpeza e pesagem dos grãos, os valores foram corrigidos para 13% de umidade e expressos em produtividade relativa. Os dados obtidos foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático. A análise da variância foi realizada através do teste F, sendo as médias quando significativas agrupadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Safra agrícola 2019/20

O consumo energético dos implementos esteve fundamentalmente atrelado à sua profundidade de atuação e por consequência, do volume de solo mobilizado em cada um dos tratamentos. Para o manejo com grade aradora na entressafra+DD na semeadora não foram feitas inferências sobre os parâmetros referentes à mecanização, uma vez que o equipamento estava subdimensionado em relação à potência disponibilizada pelo trator.

Nos manejos de solo avaliados na entressafra (subsolação e escarificação), não houve diferenças estatísticas para os parâmetros velocidade de deslocamento, potência em tração e consumo de combustível horário (Tabelas 1 e 2), os quais apresentaram valores médios de 3,4 km h⁻¹, 64 kW e 29,6 L h⁻¹, respectivamente. Por outro lado, quando foi utilizado o escarificador Ripper a 0,35 m de profundidade houve incremento de 13% no requerimento de força de tração (FT) quando comparado ao subsolador Terrus. Para Belle et al. (2014), o aumento na demanda de FT, dentre outras causas pode ser explicada pela área superficial de contato do equipamento com o solo. Assim, o maior número de hastes do escarificador, associado à maior largura das pontes promoveram um aumento na mobilização do solo em profundidade e, conseqüentemente, da demanda de FT na barra (ANEXO F). Já os valores de patinamento das rodas motrizes de 16% para o subsolador Terrus e 23% para o escarificador Ripper foram superiores aos 10% preconizados pela ASE (2003) para solos não mobilizados. Nesse sentido, Ferreira et al. (2000) relatam que valores de patinagem em solo firme superiores a 20% resultam na redução da eficiência de tração do trator.

Para a capacidade operacional (Tabela 2), a qual representa a quantidade de trabalho realizado por unidade de tempo, a maior largura útil do subsolador Terrus, 3,6 m, viabilizou um incremento de 0,23 ha h⁻¹ quando comparado ao escarificador Ripper, o qual foi capaz de realizar pouco mais de 1 ha h⁻¹. Para as condições de terras baixas, a execução das operações de manejo do solo no momento de melhor resposta é um desafio, uma vez que a drenagem deficiente dessas áreas resulta em curtos intervalos de tempo onde a umidade encontra-se adequada para o preparo mecanizado. Como resultado, pode haver dificuldade na implantação e, fundamentalmente, na eficiência desses manejos em mobilizar o perfil de solo em profundidade, especialmente em equipamentos com maior espaçamento entre hastes, a exemplo do subsolador Terrus.

Na semeadura da soja, os mecanismos de deposição do fertilizante influenciaram os parâmetros avaliados no trator. O uso da HS, seja ela descontraída ou associada ao MAS, resultou no incremento de 146% na FT e de 105% na potência em tração exigida na barra quando comparado à média dos tratamentos com DD (Tabela 1). Esses resultados corroboram com os obtidos por Santos et al. (2008), onde a HS promoveu acréscimo na exigência de FT, independentemente da velocidade de semeadura utilizada para a cultura do milho.

A maior profundidade de atuação da HS em relação ao DD resultou também no aumento do patinamento das rodas motrizes, o qual na HS descontraída chegou a 31,9%. Por conseguinte, houve redução da velocidade de deslocamento do conjunto mecanizado e da capacidade operacional do processo de semeadura, passando de 1,46 ha h⁻¹ no tratamento SPS+DD para 1,13 ha h⁻¹ na HS descontraída, representando um decréscimo de 3,3 ha em um turno de 10 h trabalhadas, por exemplo.

Devido a maior FT, a HS descontraída seguida da HS+MAS apresentaram os maiores consumos de combustível horário (L h⁻¹) e por área (L ha⁻¹), com incrementos médios de 58 e 89% respectivamente, quando comparada a média dos tratamentos com DD. Na literatura, o aumento da demanda energética na semeadura está fortemente associado à profundidade de atuação dos mecanismos responsáveis pela deposição do fertilizante e à área de solo perturbada (TRICAI et al., 2016). Corroborando com esses resultados, Vizzoto (2014) relata que o volume de solo mobilizado passou de 86 m³ ha⁻¹ no DD para 229 m³ ha⁻¹ na HS atuando a 0,18 m de profundidade, resultando em um acréscimo de 7,5 L ha⁻¹ no consumo de combustível.

Entre os tratamentos com DD na deposição do fertilizante, percebe-se que a escarificação prévia da área resultou em uma maior demanda de FT (38%), consumo de combustível horário (25%) e patinamento das rodas motrizes (74%) quando comparado ao SPS+DD. Conforme Rodrigues (2015), esse maior custo energético está relacionado à diferença na resistência ao rolamento das duas superfícies, dado que na área escarificada ocorre um maior recalque dos pneus do trator e da semeadora, sendo necessária mais energia para deslocar o conjunto mecanizado.

No solo, em função do histórico de manejo da área, houve influência dos manejos na entressafra e dos mecanismos da semeadora sobre os parâmetros físicos (Tabela 3 e Figura 1). Na camada de 0 a 0,1 m de profundidade apenas a MA na entrelinha de cultivo foi afetada, apresentando um incremento de 50% nos tratamentos escarificado+DD e grade aradora+DD quando comparado a média dos demais. Na linha de semeadura, não foram encontradas diferenças estatísticas para nenhuma das variáveis analisadas. Esses resultados vão de

encontro aos relatados por Drescher et al. (2017), onde o uso de DD e HS em diferentes profundidades não resultaram em diferenças significativas nos parâmetros D_s , MI e MA na camada de 0 a 0,07 m na linha de semeadura. De acordo com autores, esses resultados devem-se ao fato de todos os mecanismos terem atuado nessa profundidade. Cabe ressaltar ainda que a mobilização constante das áreas para o cultivo do arroz irrigado, associado a maior atividade biológica possibilitam o aumento da resiliência a desestruturação física do solo na camada superficial (VILLARREAL et al., 2020).

Por outro lado, a HS desencontrada e a HS+MAS, por viabilizarem maior mobilização do solo na linha de cultivo na camada de 0,1 e 0,2 m de profundidade resultaram na redução da D_s , apresentando valores de 1,41 e 1,36 $Mg\ m^{-3}$, o que na média representou um decréscimo de 14% em relação ao tratamento SPS+DD. Consequentemente, o espaço poroso do solo na linha de cultivo também foi afetado pelos manejos. Para a PT, a HS proporcionou aumento de 18% em relação a média dos tratamentos com DD na semeadora, já para a MA o incremento foi de 107%, o que manteve os valores acima de 0,1 $m^3\ m^{-3}$. Resultados semelhantes são descritos por Anghinoni et al. (2017), onde o uso da HS em um Latossolo sob plantio direto a 36 anos resultou na melhoria da condutividade hidráulica, da permeabilidade ao ar e da continuidade dos espaços porosos na linha de semeadura quando comparado ao solo da entrelinha.

Na camada mais profunda, 0,2 a 0,3 m, houve apenas alteração na estrutura física do solo quando foram realizados os manejos de escarificação e subsolagem na entressafra. Conforme se observar na Tabela 3, a MA média desses tratamentos foi de 0,08 $m^3\ m^{-3}$, valor 32% superior à média dos demais e, que representa um acréscimo de 25 $m^3\ ha^{-1}$ no volume de poros aptos para o fluxo de água e gases nessa camada. Vale pontuar ainda que, a escarificação também viabilizou a melhoria dos parâmetros físicos na entrelinha de cultivo, criando um maior volume de solo com a aptidão necessária para o desenvolvimento radicular das plantas, o que também foi verificado por Moraes et al. (2020).

A determinação da RP foi realizada quando o solo estava com umidade média de 0,29 $m^3\ m^{-3}$. Conforme se observa na Figura 1, os tratamentos SPS+DD e grade aradora+DD apresentaram os maiores valores de RP, os quais já a 0,1 m de profundidade superaram o limite crítico de 2 MPa. A HS foi eficiente na descompactação do solo na linha de semeadura, não sendo observado até 0,2 m valores superiores a 1,5 MPa, o que corrobora com os resultados verificados por Sartori et al. (2016). Em contrapartida, a escarificação na entressafra proporcionou a redução da RP em todo o perfil de solo analisado (linha e entrelinha), não sendo observados valores acima do limite crítico até 0,3 m de profundidade.

Em decorrência das alterações na estrutura porosa do solo, houve também diferenças no desenvolvimento radicular da soja (Figura 3). O padrão de distribuição das raízes coincidiu com a área de solo mobilizado em cada um dos tratamentos analisados. Na HS desconstruída, HS+MAS e escarificado+DD, o sistema radicular atingiu a profundidade de aproximadamente 0,25 m. Todavia, na escarificação ocorreu uma distribuição mais uniforme no perfil do solo, ao passo que na HS permaneceram concentradas na linha de cultivo. Já os tratamentos SPS+DD e grade aradora+DD concentraram as raízes na camada superficial do solo, entre 0 e 0,15 m de profundidade. Resultados semelhantes são descritos por Giacomeli et al. (2016) para a cultura do milho em um Planossolo Háplico e por Cardoso et al. (2006) para a cultura da soja em um Latossolo Vermelho.

Para Shah et al. (2017), a compactação exerce uma marcante influência no desenvolvimento radicular da soja. De acordo com Hamza e Anderson (2005), mecanicamente a pressão hidrostática na região de alongamento radicular deve ser superior às forças de coesão e atrito impostas pelas partículas do solo, caso contrário, o crescimento dessa ponta de raiz em particular cessa (HAMZA & ANDERSON, 2005). O sistema poroso é outro parâmetro importante, pois além de fornecer um caminho de menor resistência física ao crescimento das raízes, é responsável pelas trocas gasosas entre o solo e atmosfera. Deste modo, a continuidade dos espaços porosos e a presença de poros de maior calibre são fundamentais para a manutenção de um adequado fluxo de O₂ e CO₂ no perfil do solo (KAISER et al., 2009).

Nesse contexto, restrições físicas presentes nos solos de terras baixas, representadas pela elevada RP (>2MPa) e porosidade de aeração inferior a 0,1 m³ m⁻³ são alguns dos parâmetros responsáveis por ocasionar prejuízos ao estabelecimento inicial e ao crescimento radicular da soja em profundidade. Somado a isso, impactam na nodulação e na absorção de água e nutrientes pela cultura (SARTORI et al., 2016), resultando em plantas mais suscetíveis ao estresse hídrico.

A produtividade de grãos foi proporcional à capacidade de cada um dos manejos de solo em atenuar os efeitos adversos da compactação (Tabela 5). Assim, o manejo escarificado+DD viabilizou a maior produtividade, a qual no estudo foi descrita como 100%, ou 5.362 kg ha⁻¹. Na sequência, a subsolagem+DD e os tratamentos SPS+HS desconstruída e SPS+HS+MAS não diferiram estatisticamente entre si, ao passo que apresentaram um acréscimo médio de 14% quando comparados ao SPS+DD e grade aradora+DD. Cabe salientar que, devido à escassez de precipitações no transcorrer da safra 2019/20 foi necessário realizar duas irrigações por superfície no experimento, as quais aconteceram nos

estádios fenológicos R3 e R5.3 (FEHR & CAVINESS, 1977). Essa suplementação hídrica viabilizou as elevadas produtividades obtidas no experimento e ao mesmo tempo, pode ter atenuado as diferenças entre os tratamentos analisados.

3.5.2 Safra agrícola 2020/21

No segundo ano de estudo, é possível verificar que a utilização do azevém na entressafra (Fator D) não impactou significativamente nos parâmetros físicos do solo em nenhuma das camadas analisadas (Tabela 4 e Figura 2). Assim, até o momento não existem evidências claras que o sistema radicular do azevém tenha a capacidade de trazer melhorias à estrutura física do solo em apenas um ano de cultivo (tratamentos SPS+DD e SPS+HS+MAS), bem como de auxiliar na manutenção de melhorias oriundas de manejos do solo para uma segunda safra (Escarificado em 2019+DD e Subsulado em 2019+DD). Resultados similares foram encontrados por FIN et al. (2018), onde o cultivo de aveia preta, azevém e trigo durante o período de outono-inverno não resultaram em diferenças significativa para os parâmetros Ds, MA e RP quando comparado ao tratamento pousio, avaliado 18 meses após a escarificação.

Com relação aos manejos de solo, Fator A, foram obtidos resultados semelhantes aos observados na safra 2019/20. A HS reduziu a Ds e a RP na linha de cultivo, ao passo que viabilizou o aumento da MA e da PT na camada de 0,1 a 0,2 m de profundidade. Já, os tratamentos com intervenção mecânica na entressafra (Esc. em 2019+DD e Esc. em 2020+DD) obtiveram incremento médio de 50% na MA em relação ao SPS+DD, o que representou um acréscimo de $48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no volume de poros aptos ao fluxo de água e gases na camada de 0,1 a 0,3 m de profundidade. Cabe destacar ainda que a escarificação realizada em 2019 apresentou valores de Ds, MA e PT semelhantes aos verificados na escarificação realizada em 2020, além de uma expressiva redução na RP do solo quando comparado ao manejo SPS+DD. Dessa forma, é possível afirmar que, ao menos em parte, as melhorias nos parâmetros físicos do solo persistiram ao menos 15 meses após a intervenção mecânica.

Esses resultados vão ao encontro dos obtidos por Nunes et al. (2014) em um Nitossolo Vermelho e por Fin et al. (2018) em um Planossolo Háplico, onde os efeitos positivos nas propriedades físicas do solo (MA e RP) foram perceptíveis por pelo menos 18 meses após a escarificação mecânica. Sob outra perspectiva, Drescher et al. (2018) relatam que o efeito residual da escarificação varia de acordo com o parâmetro avaliado, sendo inferior a uma safra agrícola para Ds e PT em um Latossolo Vermelho de textura argilosa. Enquanto para as

propriedades relacionadas ao transporte de água no solo, tais como condutividade hidráulica e taxa de infiltração de água, percebe-se efeito positivo por até 24 meses.

O residual de intervenções mecânicas no solo está diretamente relacionado à suas características intrínsecas, associadas as condições de manejo. Nesse sentido, os teores de matéria orgânica e argila, bem como a presença de argilominerais do tipo 2:1 determinam a resiliência do solo, ou seja, sua capacidade de retornar a um novo estado de equilíbrio (BAVOSO et al., 2012). Nos Planossolos, os frequentes ciclos de umedecimento e secagem, associados ao elevado teor de silte no horizonte A promovem maior suscetibilidade a reacomodação. Dessa maneira, maior atenção deve ser dada ao tráfego de máquinas em momentos de umidade inadequada.

Para a produtividade de grãos, assim como para os parâmetros físicos do solo, não foi observado influência da utilização do azevém durante o período de entressafra (Tabela 5). Com relação aos manejos do solo, o tratamento escarificado em 2020+DD se sobressaiu dos demais, com produtividade de 5.608 kg ha⁻¹ ou 100%. Na sequência, a semeadura da soja sobre os manejos implantados em setembro de 2019 (escarificação e subsolagem) mostrou-se uma importante alternativa, uma vez que incrementa significativamente a produtividade quando comparado ao tratamento SPS+DD, ao mesmo tempo em que dilui custos e reduz operações na lavoura. Na semeadora, o uso da HS é a melhor opção, não diferindo estatisticamente dos tratamentos supracitados.

De forma geral, viabilizar o aumento no volume de solo explorado pelas raízes é crucial para o sucesso da soja em terras baixas. A escolha de como fazê-lo deve levar em consideração as peculiaridades da camada compactada e a disponibilidade dos equipamentos. A escarificação, apesar da elevada demanda energética entrega maior rendimento de grãos, sendo que parte de seus benefícios na estrutura física do solo permanecem e podem ser aproveitados para uma segunda safra agrícola. A HS em profundidade adequada é uma boa opção, pois reduz o custo com combustível quando comparada à escarificação. Já a subsolagem em terras baixas deve ser melhor compreendida, pois além do elevado custo de implantação, pode não ser eficiente na descompactação em profundidade, isso porque é demasiadamente dependente do grau de umidade do solo. Sua associação com a HS na semeadora deve ser avaliada em trabalhos futuros. O azevém na entressafra não impactada na duração das alterações oriundas de operações mecanizadas (escarificação e subsolagem) na estrutura física do solo, uma vez que aproximadamente 80% de suas raízes permanece concentrada na camada de 0 a 0,1 m de profundidade, mesmo em área escarificada (dados não

apresentados). Contudo, sob outra perspectiva a forrageira pode ser uma importante fonte de renda e proteção do solo durante o outono-inverno.

3.6 CONCLUSÕES

A escarificação reduz a resistência à penetração mecânica e aumenta a macroporosidade do solo na linha e na entrelinha de cultivo, o que se reflete no incremento da produtividade de grãos da soja em terras baixas.

A haste sulcadora aumenta o consumo energético da operação de semeadura, ao passo que atenua as restrições de ordem física do solo para o crescimento radicular da soja quando comparada ao disco duplo na deposição do fertilizante.

O efeito residual da escarificação em um Planossolo Háptico é perceptível por pelo menos 15 meses após a intervenção para os parâmetros resistência à penetração e macroporosidade do solo.

O azevém, em apenas um ano de cultivo, não interfere na manutenção dos atributos físicos do solo e na produtividade de grãos da soja.

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ANGHINONI, G. et al. Within cropping season changes in soil physical properties under no-till in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.166, p.108-112, 2017. DOI: 10.1016/j.still.2016.10.015.
- ASE D 497 FEB03. **Agricultural Machinery Management Data**. In: ASE Standarts: standarts engineering practices data. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering, p.373-380. 2003.
- BAVOSO, M.A. et al. Resiliência física de dois Latossolos Vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1892-1904, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000600023.
- BELLE, M.P. et al. Demanda energética e mobilização do solo com o uso de escarificadores em sistemas de semeadura direta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.551-558, 2014. DOI: 10.1590/S1415-43662014000500013.
- CARAFFA, M. et al. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2018/19 e 2019/20** - Três de Maio: SETREM, 2019. 105p.

CARDOSO, E.G. et al. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.3, p.493-501, 2006. DOI: 10.1590/S0100-204X2006000300017.

CARVALHO, P.C.F. et al. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola no Subtrópico Brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.8, p.325-380, 2013.

COELHO, L.L. et al. Seeding furrow opening mechanisms and the soybean planting in lowland areas. **Ciência Rural**, v.50, e20190870, 2020. DOI: 10.1590/0103-8478cr20190870.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em:<
<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=10>>. Acessado em: 31 de setembro de 2021.

DONAGEMA, G.K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

DRESCHER, M.S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.159-168, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000200008.

DRESCHER, M.S. et al. Fertilizer shanks to promote soil decompaction in the seeding operation. **Ciência Rural**, v.47, n.2, e20160026, 2017. DOI: 10.1590/0103-8478cr20160026.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: State University of Science and Technology, 1977. 11p. (Special report, 80).

FERREIRA, M.F. et al. Relação cinemática em um trator 4x2 com tração dianteira auxiliar equipado com pneus radiais na eficiência de tração. **Ciência Rural**, v.30, n.6, p.983-986, 2000. DOI: 10.1590/S0103-84782000000600010.

FIN, S.S. et al. Duration of the effects of scarification and raised bed associated with vegetation cover on soybean yield on an Alfisol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.11, p.1230-1238, 2018. DOI: 10.1590/s0100-204x2018001100005.

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**, v.14, n.3, e0208, 2016. DOI:10.5424/sjar/2016143-9148.

GABRIEL-FILHO, A. et al. Desempenho de um trator operando em solo com diferentes tipos de coberturas vegetais. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.3, p.781-789, 2004. DOI: 10.1590/S0100-69162004000300032.

GIACOMELI, R. et al. Escarificação ferhdo solo e sulcadores em semeadora para cultivo de milho em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.3, p.261-270, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000300008.

GOMES, A.S. et al. **Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase as áreas de várzea do Rio Grande do Sul**. Embrapa Clima Temperado, 2006. 40p. (Documentos, 169).

GUBIANI, P.I. et al. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.42, e0170282, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbc20170282.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v.82, p.121-145, 2005. DOI: 10.1016/j.still.2004.08.009.

IRGA. **Instituto Rio Grandense de Arroz**. Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/upload/arquivos/24143018-soja-em-rotacao-com-arroz.pdf>>. Acesso em: 31 de julho de 2020.

KAISER, D.R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.845-855, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400009.

KLEIN, V.A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v.40, n.7, p.1550-1556, 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782010005000110.

MATOCHA, C.L. et al. Influence of ryegrass on physico-chemical properties of a Fragipan soil. **Geoderma**, v.317, p.32-38, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.12.004.

MORAES, M.T. et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.200, 104611, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2020.104611.

NUNES, M.R. et al. Dynamic changes in compressive properties and crop response after chisel tillage in a highly weathered soil. **Soil & Tillage Research**, v.186, p.183-190, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2018.10.017.

NUNES, M.R. et al. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.7, p.531-539, 2014. DOI: 10.1590/S0100-204X2014000700005.

RIBAS, G.G. et al. Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. **Agricultural Systems**, v.188, 103036, 2021. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103036.

RIBEIRO, P.L. et al. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1484-1491, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900047.

RODRIGUES, F.A. **Avaliação de sistemas de implantação de soja em áreas típicas de cultivo de arroz irrigado**. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2015.

ROSA, L.S. da. **Projeto e desenvolvimento de um sistema de aquisição e armazenamento de dados para avaliações de máquinas agrícolas**. 61f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2019.

RUSSINI, A. **Projeto, construção e teste de instrumentação eletrônica para avaliação de tratores agrícolas**. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2009.

SANTOS, A.P. et al. Performance for three seeder-fertilizer no till machine for or the corn crop. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.2, p.540-546, 2008. DOI: 10.1590/S1413-70542008000200030.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5^o edição. ed. Embrapa, Brasília, 2018.

SARTORI, G.M.S. et al. Growth and development of soybean roots according to planting management systems and irrigation in lowland areas. **Ciência Rural**, v.46, n.9, p.1572-1578, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20151579.

SHAH, A.N. et al. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview **Environmental Science and Pollution Research**, v.24, p.10056-10067, 2017. DOI: 10.1007/s11356-017-8421-y.

SORACCO, C.G. et al. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.408-415, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140359.

SOSBAI - Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. Arroz irrigado: **Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Bento Gonçalves, SOSBAI. 2018. 205p. Disponível em: < https://www.sosbai.com.br/uploads/documentos/recomendacoes-tecnicas-da-pesquisa-para-o-sul-do-brasil_906.pdf>. Acesso em: 29 de julho de 2020.

SUN, M. et al. Long-term evaluation of tillage methods in fallow season for soil water storage, wheat yield and water use efficiency in semiarid southeast of the Loess Plateau. **Field Crops Research**, v.218, p.24-32, 2018. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.12.021.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal Soil Research**, v.17, p.429-441, 1979. DOI: 10.1071/90429.

TRICAI, E. et al. Energy demand of furrow openers and corn yield according to the soil disturbance in no till system. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, n.17, p. 1538-1542, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2015.8789.

VILLARREAL, R. et al. Pore system configuration and hydraulic properties. Temporal variation during the crop cycle in different soil types of Argentinean Pampas Region. **Soil & Tillage Research**, v.198, e.104528, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2019.104528.

VIZZOTTO, V.R. **Desempenho de mecanismos sulcadores da semeadora-adubadora sobre alguns atributos físicos do solo de várzea no comportamento da cultura da soja**. 2014. 77f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

Tabela 1 - Velocidade de deslocamento do conjunto mecanizado, força de tração, potência em tração e patinamento das rodas motrizes em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Safra 2019/20. Santa Maria, RS. 2021.

Tratamento	Velocidade (km h ⁻¹)		Força de tração (kN)	
	MSE	Semeadura	MSE	Semeadura
SPS + disco duplo (DD)	-	4,86 a ⁽¹⁾	-	11,82 d
SPS + HS desencontrada	-	3,79 c	-	36,18 a
SPS + HS + MAS	-	4,21 b	-	32,70 b
Escarificado (Ripper) + DD	3,22 ^{ns}	4,68 a	72,06 a	16,38 c
Grade aradora + DD	-	4,93 a	-	13,14 d
Subsolado (Terrus) + DD	3,60	4,71 a	63,73 b	14,58 c
Média	3,41	4,53	67,89	20,82
CV (%)	8,37	3,37	6,20	7,02
Tratamento	Potência em tração (kW)		Patinamento (%)	
	MSE	Semeadura	MSE	Semeadura
SPS + disco duplo (DD)	-	16,01 b	-	6,03 d
SPS + HS desencontrada	-	38,15 a	-	31,93 a
SPS + HS + MAS	-	38,29 a	-	21,29 b
Escarificado (Ripper) + DD	64,28 ^{ns}	21,32 b	23,37 ^{ns}	10,52 c
Grade aradora + DD	-	18,04 b	-	5,13 d
Subsolado (Terrus) + DD	63,55	19,11 b	16,06	6,46 d
Média	63,91	25,14	14,01	13,34
CV (%)	14,42	8,36	40,72	19,43

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knot ($p \leq 0,05$). MSE: manejo do solo na entressafra. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo.

Tabela 2 - Capacidade operacional, consumo e custo de combustível em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Safra 2019/20. Santa Maria, RS. 2021.

Tratamento	C. operacional (ha h ⁻¹)		Consumo (L h ⁻¹)	
	MSE	Semeadura	MSE	Semeadura
SPS + disco duplo (DD)	-	1,46 a	-	10,87 d
SPS + HS desencontrada	-	1,13 c	-	19,37 a
SPS + HS + MAS	-	1,27 b	-	19,02 a
Escarificado (Ripper) + DD	1,06 b ⁽¹⁾	1,40 a	29,61 ^{ns}	13,65 b
Grade aradora + DD	-	1,48 a	-	11,57 d
Subsolado (Terrus) + DD	1,29 a	1,41 a	29,73	12,42 c
Média	1,17	1,36	26,24	14,49
CV (%)	8,46	3,38	7,91	3,90

Tratamento	Consumo (L ha ⁻¹)		Custo de combustível (ha)	
	MSE	Semeadura	CTC	Custo (R\$ ha ⁻¹)
SPS + disco duplo (DD)	-	7,44 e	7,44	49,77
SPS + HS desencontrada	-	17,03 a	17,03	113,93
SPS + HS + MAS	-	15,06 b	15,06	100,75
Escarificado (Ripper) + DD	28,07 a	9,72 c	37,79	252,81
Grade aradora + DD	-	7,82 e	-	-
Subsolado (Terrus) + DD	24,01 b	8,82 d	32,83	219,63
Média	25,54	10,98	-	-
CV (%)	7,13	4,14	-	-

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knot ($p \leq 0,05$). Preço do diesel S10 em Santa Maria-RS: 6,69 R\$ (dia 30/03/2022). MSE: manejo do solo na entressafra. SPS: sem preparo do solo; HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo. CTC: consumo total de combustível (manejos de entressafra + semeadura).

Tabela 3 - Densidade (Ds), macroporosidade (MA) e porosidade total (PT) na linha e na entrelinha de semeadura em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada. Safra 2019/20. Santa Maria, RS. 2021.

Tratamentos	Linha de semeadura			Entrelinha de semeadura		
	Ds (Mg m ⁻³)	MA (m ³ m ⁻³)	PT	Ds (Mg m ⁻³)	MA (m ³ m ⁻³)	PT
-----0 a 0,1-----						
SPS + DD	1,34 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,49 ^{ns}	1,44 ^{ns}	0,09 b ⁽¹⁾	0,43 ^{ns}
SPS + HS desen.	1,27	0,19	0,51	1,42	0,11 b	0,44
SPS + HS + MAS	1,25	0,19	0,52	1,46	0,09 b	0,43
Esc. (Ripper) + DD	1,27	0,19	0,52	1,29	0,15 a	0,49
Grade aradora + DD	1,25	0,20	0,52	1,31	0,15 a	0,48
Subs. (Terrus) + DD	1,33	0,16	0,49	1,41	0,11 b	0,45
Média	1,29	0,18	0,51	1,39	0,12	0,45
CV (%)	5,29	20,8	8,69	9,08	27,4	11,1
-----0,1 a 0,2-----						
SPS + DD	1,58 a	0,06 b	0,38 b	1,59 a	0,06 b	0,38 b
SPS + HS desen.	1,41 c	0,13 a	0,45 a	1,59 a	0,05 b	0,38 b
SPS + HS + MAS	1,36 c	0,16 a	0,47 a	1,64 a	0,05 b	0,36 b
Esc. (Ripper) + DD	1,48 b	0,09 b	0,42 b	1,46 b	0,09 a	0,42 a
Grade aradora + DD	1,58 a	0,06 b	0,38 b	1,57 a	0,07 b	0,38 b
Subs. (Terrus) + DD	1,54 a	0,07 b	0,39 b	1,58 a	0,06 b	0,38 b
Média	1,49	0,09	0,41	1,57	0,06	0,38
CV (%)	4,13	26,7	6,05	4,59	22,9	7,74
-----0,2 a 0,3-----						
SPS + DD	1,59 a	0,05 b	0,38 ^{ns}	1,53 ^{ns}	0,06 b	0,40 ^{ns}
SPS + HS desen.	1,64 a	0,04 b	0,38	1,55	0,05 b	0,39
SPS + HS + MAS	1,55 a	0,06 b	0,39	1,60	0,05 b	0,37
Esc. (Ripper) + DD	1,47 b	0,09 a	0,42	1,48	0,07 a	0,42
Grade aradora + DD	1,53 a	0,05 b	0,41	1,51	0,05 b	0,41
Subs. (Terrus) + DD	1,51 a	0,07 a	0,40	1,50	0,05 b	0,41
Média	1,54	0,06	0,40	1,59	0,05	0,40
CV (%)	4,56	31,3	7,75	4,60	23,4	7,21

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). ^{ns} não significativo.

SPS: sem preparo do solo. DD: disco duplo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação de solo.

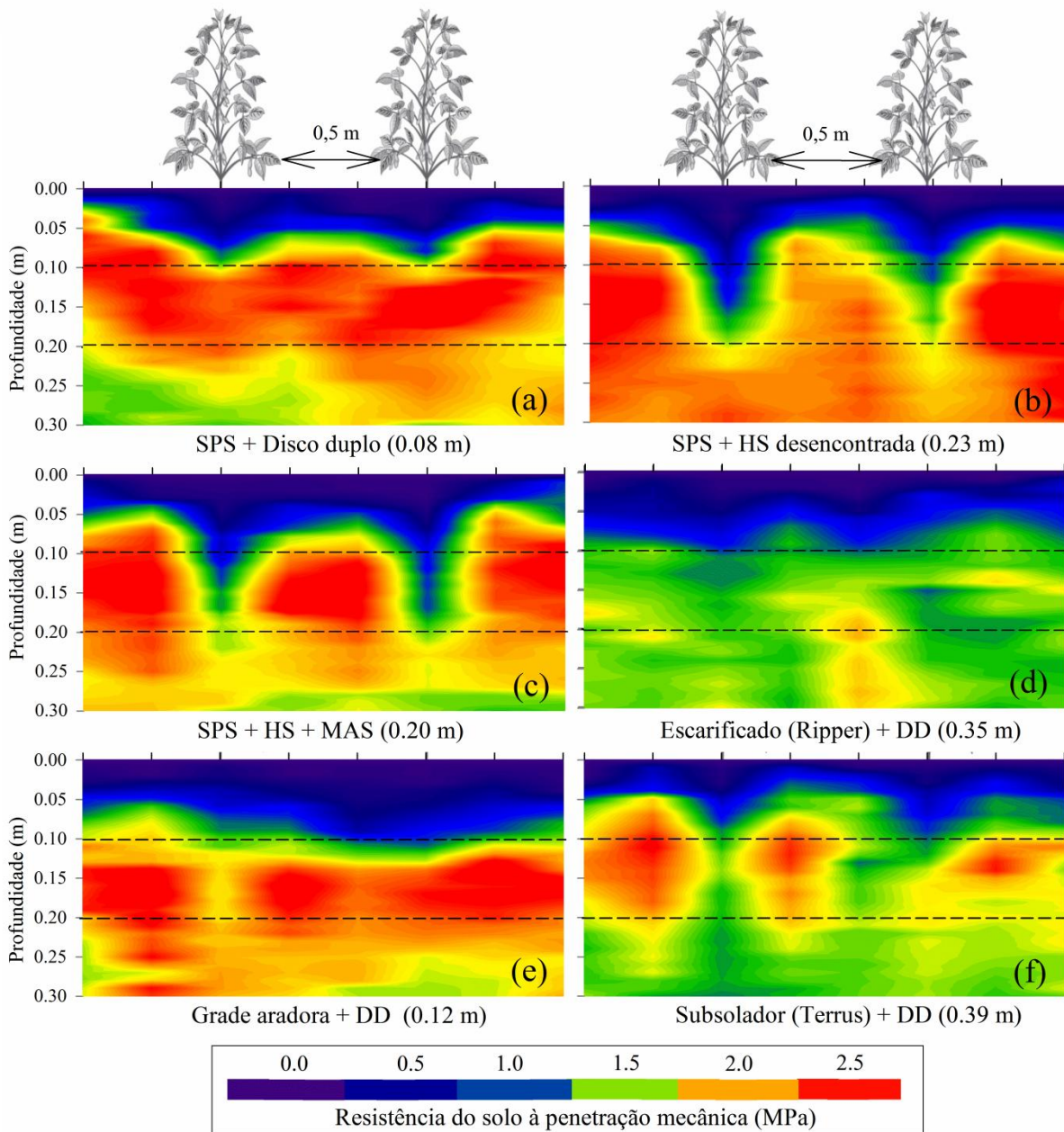
Tabela 4 - Densidade (Ds), macroporosidade (MA) e porosidade total (PT) do solo na linha de semeadura em função de manejos do solo na entressafra, de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora e do uso de azevém em área de terras baixas compactada. Safra 2020/21. Santa Maria, RS. 2021.

Manejos de solo	Ds	MA	PT
	(Mg m ⁻³)	------(m ³ m ⁻³)-----	
-----0 a 0,1 m-----			
SPS + disco duplo (DD)	1,34 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,48 ^{ns}
SPS + HS + MAS	1,33	0,16	0,48
Escarificado em 2019 + DD	1,33	0,14	0,48
Escarificado em 2020 + DD	1,32	0,15	0,49
Subsolado em 2019 + DD	1,37	0,13	0,47
Planta de cobertura			
Com azevém	1,33 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,48 ^{ns}
Sem azevém	1,36	0,14	0,47
Média	1,34	0,14	0,48
CV (%)	5,68	21,43	7,15
-----0,1 a 0,2 m-----			
SPS + disco duplo (DD)	1,61 a ⁽¹⁾	0,05 c	0,38 b
SPS + HS + MAS	1,39 c	0,13 a	0,46 a
Escarificado em 2019 + DD	1,51 b	0,08 b	0,41 b
Escarificado em 2020 + DD	1,48 b	0,09 b	0,41 b
Subsolado em 2019 + DD	1,52 b	0,06 c	0,40 b
Planta de cobertura			
Com azevém	1,52 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,41 ^{ns}
Sem azevém	1,49	0,08	0,41
Média	1,51	0,08	0,41
CV (%)	6,48	32,49	9,93
-----0,2 a 0,3 m-----			
SPS + disco duplo (DD)	1,60 ^{ns}	0,04 c	0,37 ^{ns}
SPS + HS + MAS	1,59	0,05 c	0,38
Escarificado em 2019 + DD	1,53	0,07 b	0,40
Escarificado em 2020 + DD	1,56	0,09 a	0,39
Subsolado em 2019 + DD	1,53	0,07 b	0,40
Planta de cobertura			
Com azevém	1,58 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,38 ^{ns}
Sem azevém	1,55	0,06	0,39
Média	1,56	0,06	0,39
CV (%)	6,01	21,2	9,04

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05). ^{ns} não significativo.

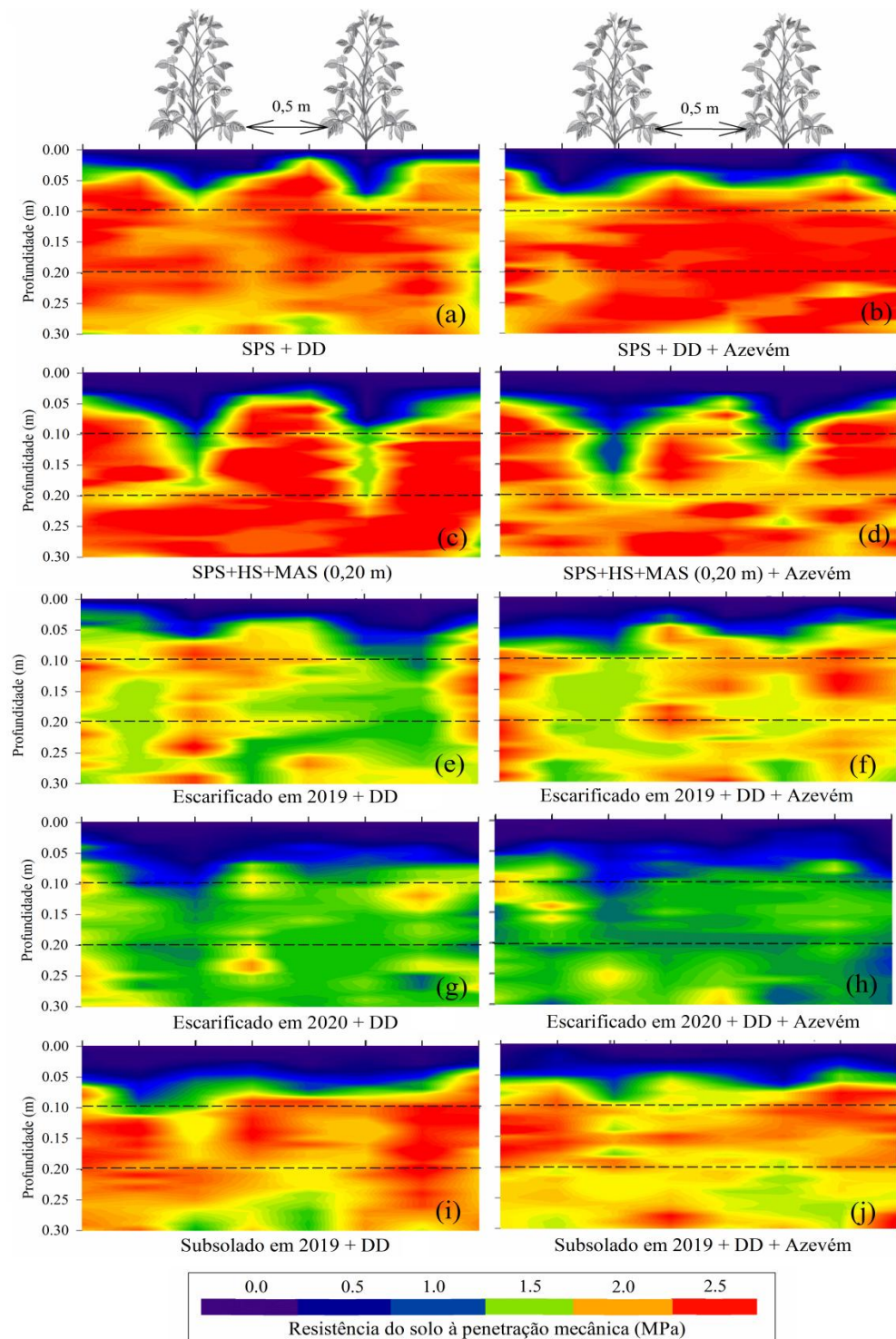
SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação de solo.

Figura 1 - Distribuição da resistência do solo à penetração mecânica em semeadura SPS+DD (A), SPS+HS desencontrada (B), SPS+HS+MAS (C), escarificado+DD (D), grade aradora+DD (E) e subsolado+DD (F) em área de terras baixas compactada. A umidade volumétrica do solo na camada de 0 a 0,3 m de profundidade era de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Safra 2019/20. Santa Maria, RS. 2021. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo. DD: disco duplo.



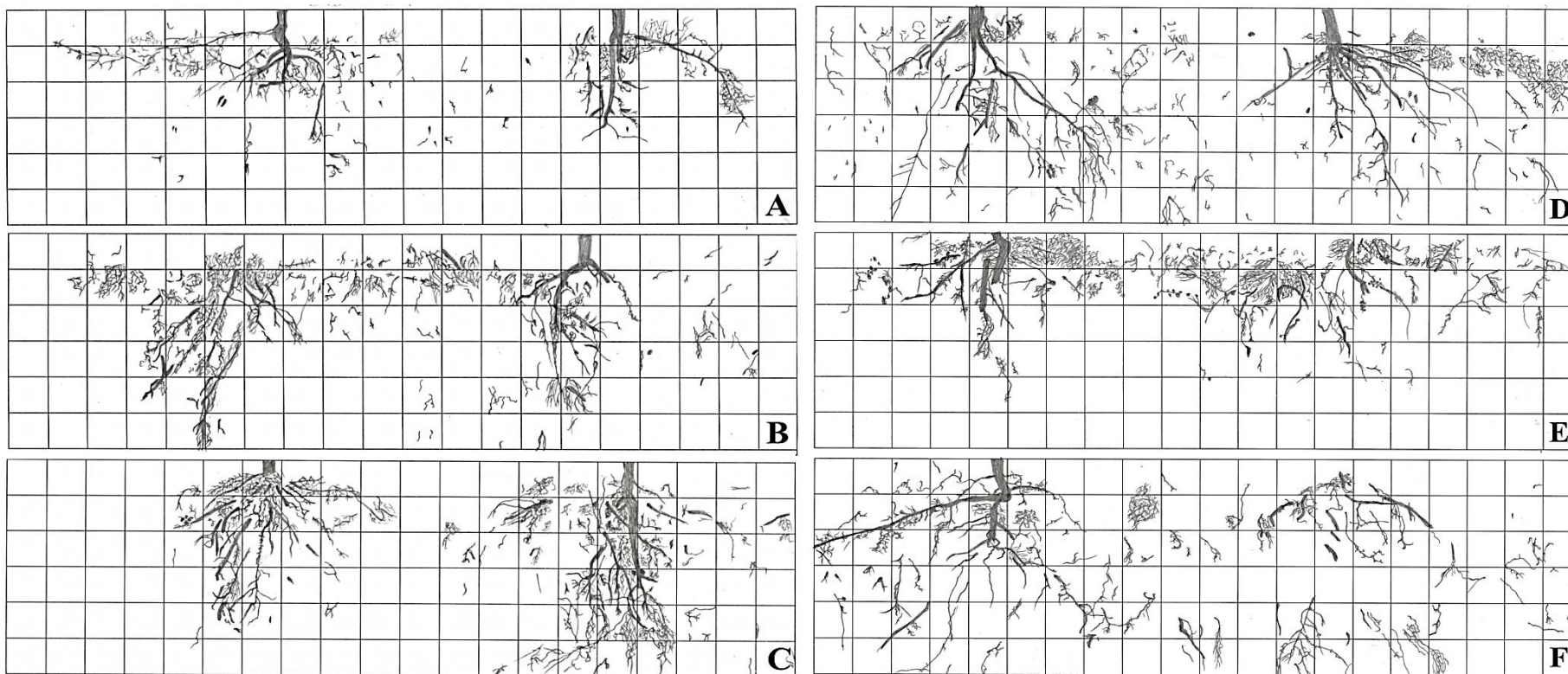
Fonte: Autor.

Figura 2 - Distribuição da resistência do solo à penetração mecânica em semeadura SPS+DD (A e B), SPS+HS+MAS (C e D), escarificado em 2019+DD (E e F), escarificado em 2020+DD (G e H) e subsolado em 2019+DD (I e J), sem azevém (A, C, E, G e I) e com azevém (B, D, F, H, J) na entressafra em área de terras baixas compactada. A umidade volumétrica do solo na camada de 0 a 0,3 m era de $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Safra 2020/21. Santa Maria, RS. 2021. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo. DD: disco duplo.



Fonte: Autor.

Figura 3 - Distribuição do sistema radicular da soja em função de manejos do solo na entressafra e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora: SPS+DD (A), SPS+HS desencontrada (B), SPS+HS+MAS (C), escarificado+DD (D), grade aradora+DD (E) e subsolado+DD (F) na safra agrícola 2019/20. Malha de 0,05x0,05 m. Santa Maria, RS. 2021. SPS: sem preparo do solo. DD: disco duplo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo.



Fonte: Autor.

Tabela 5 - Produtividade relativa de grãos da soja em função de manejos do solo na entressafra, de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora e do uso de azevém na entressafra em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.

Manejos do solo	Prod. relativa (%) - Safra 2019/20
SPS + disco duplo (DD)	73,8 c ⁽¹⁾
SPS + HS desencontrada	90,6 b
SPS + HS + MAS	90,7 b
Escarificado (Ripper) + DD	100,0 a
Grade aradora + DD	80,8 c
Subsolado (Terrus) + DD	93,3 b
Média	88,2
CV (%)	7,65
Manejos do solo	Prod. relativa (%) - Safra 2020/21
SPS + disco duplo (DD)	81,7 c
SPS + HS desencontrada	89,1 b
SPS + HS + MAS	92,4 b
Escarificado em 2019 + DD	90,5 b
Escarificado em 2020 + DD	100,0 a
Subsolado em 2019 + DD	89,1 b
Planta de cobertura	
Com azevém	95,8 ^{ns}
Sem azevém	100,0
Média	90,5
CV (%)	8,43

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott Knot ($p \leq 0,05$). ^{ns} não significativo.

SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo.

4 ARTIGO III

MANEJO DE SOLO E AZEVÉM NO DESEMPENHO AGRONÔMICO DA SOJA EM TERRAS BAIXAS

SOIL MANAGEMENT AND RYEGRASS IN SOYBEAN AGRONOMIC PERFORMANCE IN LOWLAND AREAS

4.1 RESUMO

A drenagem deficiente e o elevado nível de compactação dos solos de terras baixas impõem restrições ao desenvolvimento radicular da soja e limitam seu potencial produtivo. O estudo teve como objetivo avaliar manejos do solo, cultivo de azevém e uso de mecanismos de deposição do fertilizante na semeadora-adubadora sobre o desenvolvimento da soja em área de terras baixas. O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Santa Maria, sob o delineamento de blocos ao acaso, em um bifatorial 6x2. Os níveis do fator A foram implantados na safra 2019/20, sendo composto por manejos do solo na entressafra associados a mecanismos de deposição do fertilizante de uma semeadora-adubadora: (A1) sem preparo do solo (SPS)+disco duplo na semeadora (DD); (A2) SPS+haste sulcadora (HS) desconstruída; (A3) SPS+HS+mecanismo de acomodação do solo; (A4) escarificado+DD; (A5) grade aradora+DD e (A6) subsolado+DD. O fator D foi implementado previamente a colheita da soja no primeiro ano de estudo, sendo composto pelo cultivo do azevém na entressafra (D1) e pousio da área (D2). Na safra 2020/21 foi adicionado o tratamento Escarificado em 2020+DD. Os manejos com grade aradora+DD e SPS+DD apresentam menor volume de solo apto para o desenvolvimento radicular da plantas (espaço aéreo e resistência à penetração), o que reduziu a massa seca de nódulos, a taxa fotossintética e a produtividade de grãos da soja. Parte dos benefícios advindos da escarificação sob o desenvolvimento de plantas é perceptível por no mínimo 15 meses após a intervenção mecânica no solo, contudo, há redução da produtividade quando comparada ao manejo realizado mais próximo a semeadura. A associação do azevém a manejos físicos do solo, em uma única safra agrícola, não impacta a produtividade de grãos da soja.

Palavras-chave: Planossolo. *Glycine max* (L.) Merrill. Escarificação. Compactação. Haste sulcadora. *Lolium multiflorum*.

4.2 ABSTRACT

Poor drainage and the high level of compaction in lowland soils impose restrictions on soybean root development, and consequently limit its yield potential. The study aimed to evaluate soil management, Italian ryegrass cultivation and use of fertilizer deposition mechanisms in the seeder-fertilizer on soybean development in lowland areas. The experiment was carried out at the Federal University of Santa Maria, under a randomized block design, in a 6x2 bifactorial. The levels of factor A were implemented in the 2019/20 season, consisting of soil management in the off-season associated to fertilizer deposition mechanisms of a seeder-fertilizer: (A1) no soil preparation (NSP)+double disc (DD); (A2) NSP+chisel (CH) not aligned; (A3) NSP+CH+soil accommodation mechanism (SAM); (A4) scarified+DD; (A5) disc harrow+DD and (A6) chisel tillage+DD. Factor D was implemented previously to soybean harvesting in the first year of the study, consisting of Italian ryegrass cultivation in the off-season (D1) and fallow (D2). In the 2020/21 crop, the treatment Scarified in 2020+DD was added. The managements with disc harrow+DD and NSP+DD show a lower volume of able soil for plant root development (aerial space and penetration resistance), which reduced the nodules dry mass, the photosynthetic rate and the soybean grain yield. Part of the benefits arising from scarification under plant development is noticeable for at least 15 months after mechanical intervention in the soil, however, there is a reduction in grain yield when compared to the management carried out closer to sowing. The association of italian ryegrass with physical soil management, in a single agricultural crop, does not impact soybean grain yield.

Keywords: Alfisol. *Glycine max* (L.) Merrill. Scarification. Compaction. Shank. *Lolium multiflorum*.

4.3 INTRODUÇÃO

Nas áreas de terras baixas do Rio Grande do Sul, Brasil, a inserção da soja em sistema de rotação de culturas com o arroz irrigado tem sido uma importante ferramenta na busca por sustentabilidade econômica das propriedades rurais (RIBAS et al., 2021). Assim, em virtude dos benefícios advindos ao sistema orizícola, com destaque para o controle de plantas daninhas resistentes, na safra agrícola 2020/21 foram semeadas aproximadamente 370 mil hectares de soja nesse sistema de produção (IRGA, 2020).

Apesar do avanço significativo em área, a produtividade média da leguminosa nesse ambiente ainda está aquém do potencial produtivo das cultivares atualmente disponíveis no mercado. Nesse sentido, a densidade elevada e a formação de um ambiente hidromórfico com restrição a drenagem são algumas das limitações presentes nos solos típicos de terras baixas (BAMBERG et al., 2009; BUENO et al., 2020). Associado a isso, frequentemente o preparo mecanizado das áreas ocorre sob condições de umidade inadequada, propiciando a formação de uma camada com elevado grau de compactação próximo a superfície do solo, o que agrava os problemas de ordem física dos mesmos (PEDROTTI et al., 2005; GOULART et al., 2020).

De acordo com Gupta et al. (1989), a compactação pode ser definida como um processo de compressão do solo não saturado, que ocorre de forma antrópica, e que resulta em mudanças em sua estrutura física. A quebra da continuidade e a redução do volume do espaço poroso são alguns dos atributos afetados negativamente (BJÖRKLUND et al., 2016). Como resultado de tais perturbações, há um aumento da relação entre micro e macroporos, o que consequentemente prejudica a condutividade hidráulica da água e a permeabilidade do solo ao ar (GUBIANI et al., 2018). Somado a isso, a aproximação entre as partículas do solo resulta ainda no aumento da densidade e da resistência à penetração mecânica.

A maior suscetibilidade da soja a estresses hídricos é uma das consequências oriundas de tais alterações. Em períodos de elevada precipitação, as plantas permanecem por um período maior de tempo sujeitas à deficiência de oxigênio no solo, uma vez que há restrição ao fluxo vertical da água (FIN et al., 2018). Por outro lado, o aumento da resistência à penetração, associada à capacidade reduzida do solo em realizar trocas gasosas propicia a redução do volume radicular da soja em profundidade (COELHO et al., 2020), o que limita o acesso a água. Deste modo, as plantas ficam mais suscetíveis à alternância entre o excesso e a deficiência hídrica na zona de maior concentração radicular.

Fisiologicamente, a restrição de O_2 como aceptor final de elétrons na cadeia respiratória limita a produção de Adenosina Trifosfato (ATP) nas mitocôndrias (TAIZ et al., 2017). Na sequência, ocorre a redução do potencial hídrico através da endoderme, o qual inviabiliza a absorção de água e nutrientes pelas plantas (SAIRAM et al., 2008). Já quando a taxa de perda de água por evapotranspiração excede a capacidade de absorção, há o fechamento estomático, e por fim, a redução das trocas gasosas via inibição da fotossíntese (TAIZ et al., 2017).

A fixação biológica de nitrogênio, a qual responde por algo entre 50 e 80% do nitrogênio assimilado pela soja (CIAMPITTI & SALVAGIOTTI, 2018) é outro processo extremamente sensível as flutuações de umidade no solo (MWAMLIMA et al., 2019).

Segundo Taiz et al. (2017) é necessário 9,3 moles de CO₂ para cada mol de N₂ fixado da atmosfera, com um custo aproximado de 16 ATPs. Assim, a disponibilidade de O₂ no solo é vital para a manutenção da produção energética via respiração aeróbica. Aliado a isso, a escassez de água compromete a sobrevivência e a duração dos nódulos (HUNGRIA & VARGAS, 2000), bem como reduz o transporte de compostos nitrogenados (alantoína e ácido alantóico) para a parte aérea das plantas (CEREZINI et al., 2014).

Dessa forma, amenizar os estresses resultantes das limitações físicas do solo surge como um dos primeiros preceitos técnicos a ser observado na busca por um cultivo de soja com menos riscos nesse ambiente. A haste sulcadora na semeadora tem mostrado resultados promissores, especialmente sob condições de estresses hídricos mais brandos (SARTORI et al., 2016; COELHO et al., 2020). Escarificadores (CALONEGO & ROSALEM, 2010; GUBIANI et al., 2018) e subsoladores (SCHNEIDER et al., 2017) também têm sido empregados com sucesso na melhoria do ambiente radicular para soja e milho. Porém, o elevado custo de implantação (FIORESI et al., 2019), associado a tendência de reacomodação das partículas do solo são alguns dos fatores limitantes a adoção de tais manejos.

Na perspectiva de diluir gastos e operações de máquinas a campo, o uso de uma planta de cobertura durante a entressafra pode auxiliar na manutenção dos benefícios advindos da mobilização do solo por um maior período de tempo. Para as áreas de terras baixas, o azevém (*Lolium multiflorum*) surge como uma boa alternativa, pois dentre outras vantagens apresenta elevada capacidade de produção de massa seca, baixo custo de implantação e boa tolerância ao excesso hídrico, o qual é frequente nessas áreas durante o outono-inverno (COELHO et al., 2020).

Mediante ao contexto apresentado, o presente estudo teve como objetivo avaliar manejos do solo, cultivo de azevém e uso de mecanismos de deposição do fertilizante na semeadora-adubadora sobre o desenvolvimento da soja em área de terras baixas.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido a campo durante as safras agrícolas 2019/20 e 2020/21, na área didático-experimental do Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil (29°43'S, 53°43'W e altitude de 94 m). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é caracterizado como subtropical úmido (Cfa), sem estação seca definida e com precipitação pluviométrica média de 1.616 mm ao ano (ALVARES et al., 2013). O solo da área é classificado como Planossolo Háplico

Alumínico gleissólico (SANTOS et al., 2018), com caracterização físico-química descrita na Tabela 1.

A área de instalação do experimento foi cultivada com arroz irrigado na safra 2018/19, sendo o mesmo colhido em solo seco. Durante a entressafra, no mês de abril, foi realizada a aplicação 4 Ton. ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT de 65%) em superfície. Após, a área permaneceu com pequena massa de plantas (espontâneas e azevém) até a semeadura da soja.

O experimento foi implantado no delineamento de blocos ao acaso, em um bifatorial 6x2 com quatro repetições. Os níveis do fator A foram implantados na safra 2019/20, sendo composto por manejos do solo na entressafra associados a mecanismos de deposição do fertilizante de uma semeadora-adubadora, sendo eles: (A1) sem preparo do solo (SPS)+disco duplo (DD) na semeadora; (A2) SPS+haste sulcadora (HS) desencontrada na semeadora; (A3) SPS+HS+mecanismo de acomodação do solo (MAS); (A4) escarificado+DD; (A5) grade aradora+DD e (A6) subsolado+DD. O fator D foi implementado previamente a colheita da soja no primeiro ano de estudo, sendo composto pelo cultivo do azevém na entressafra (D1) e pousio da área (D2). Os manejos com escarificação e subsolagem estabelecidos na safra 2019/20 não foram refeitos no segundo ano de experimento, transformando-se nos tratamentos Escarificado em 2019+DD (A4) e Subsolado em 2019+DD (A6), respectivamente. Os mecanismos da semeadora (HS e DD) foram utilizados nas duas safras agrícolas conforme estabelecido em cada tratamento.

No dia 28 de setembro de 2019 foram implantados os manejos de solo na entressafra. A profundidade de atuação dos implementos foi de 0,35, 0,39 e 0,12 m de profundidade, respectivamente para a escarificação, subsolagem e gradagem do solo. Na safra 2020/21 foi adicionado o tratamento Escarificado em 2020+DD ao Fator A, sendo a intervenção mecânica realizada no dia 24 de setembro de 2020. Já manejo grade aradora+DD foi suprimido.

Para a semeadura da soja foi utilizada uma semeadora-adubadora pantográfica da marca Massey Ferguson, modelo MF 407. Nos níveis A1, A4, A5 e A6 do fator A, os DD desencontrados atuaram a profundidade média de 0,08 m. As HS utilizadas nos níveis A2 e A3 mediam 0,43 m de comprimento e apresentavam ponteiros com largura de 21,3 mm. No tratamento SPS+HS desencontrada, a haste foi deslocada 0,05 m da linha de deposição das sementes e atuou a profundidade média de 0,23 m. Já no tratamento SPS+HS+MAS, a profundidade de atuação foi de 0,20 m.

No primeiro ano de estudo, a semeadura da soja ocorreu no dia 19 de novembro de 2019, sendo utilizada a cultivar DM 66i68 IPRO, de ciclo indeterminado e grupo de maturação 6,6. A densidade de semeadura foi de 28,6 sementes m⁻². Na safra 2020/21, em

função da umidade do solo, a implantação foi realizada em dois momentos distintos. O primeiro para os tratamentos sem azevém na entressafra, no dia 02 de novembro, e em um segundo momento, no dia 11 de novembro de 2020 para os manejos com azevém. Na referida safra foi utilizada a cultivar BS 2606 IPRO, de ciclo indeterminado e grupo de maturação 6.0. A densidade de semeadura foi de 30,6 sementes m^{-2} .

Nas duas safras a adubação da soja foi composta de 18 kg ha^{-1} de N, 72 kg ha^{-1} de P_2O_5 , 72 kg ha^{-1} de K_2O , 18 kg ha^{-1} de Ca^{2+} e 18 kg ha^{-1} de SO_4^{-2} na linha de semeadura. No estágio fenológico V6/V7 (FEHR & CAVINESS, 1977) foi aplicado a lanço 35 kg ha^{-1} de K_2O . Os demais tratamentos culturais foram realizados conforme as recomendações técnicas para a cultura (CARAFFA et al., 2018).

O azevém (Fator D) foi semeado a lanço em sobressemeadura quando a soja estava no estágio fenológico R7, no dia 30 de março de 2020, na quantidade de 40 kg de semente ha^{-1} . A adubação na entressafra foi realizada na forma de 45 kg ha^{-1} de N e 75 kg ha^{-1} de P_2O_5 no início do perfilhamento das plantas. A cultura foi dessecada no dia 25 de agosto de 2021, 78 dias antes da semeadura da soja. A MS residual média do azevém no momento da semeadura da soja era de 4.317 kg ha^{-1} e não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos.

A população inicial de plantas (PIP) foi quantificada em dois m^2 previamente demarcados na segunda linha de cultivo de cada unidade experimental (UE). Para a avaliação do desempenho agrônômico das plantas de soja foram determinados nos estádios V7/V8 e R5.1 a massa seca da parte aérea (MSPA), a massa seca de nódulos (MSN) e a estatura de plantas. Para isso, foi coletado um monólito de solo (0,5x0,4x0,25 m de comprimento, largura e profundidade) contendo cinco plantas por UE. Em seguida, foi separada a parte aérea do sistema radicular das plantas. Para quantificar a MSN, as raízes foram lavadas em água corrente para a separação do solo. Após, os nódulos e a parte aérea foram levados a estufa de ventilação forçada a 65°C até massa constante.

Na safra 2019/20 foram avaliados os parâmetros comprimento (C), área superficial (AS), volume (V) e diâmetro médio (DM) do sistema radicular das plantas de soja no estágio R5.1. As determinações foram realizadas através da digitalização das raízes em escâner de alta resolução (Epson Expression 11000 XL) no laboratório de fisiologia vegetal da UFSM. Posteriormente, as imagens foram processadas no software Winrhizo PRO.

Os aspectos relacionados à fotossíntese foram quantificados nos estádios V6/V7 e R5.2, para as safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. Para isso, foi utilizado um analisador de gás por radiação infravermelha (marca WALIS, modelo GFS-3000) com uma concentração de CO_2 de 400 $\mu mol mol^{-1}$ e radiação fotossintética de 1500 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$. Na

ocasião foram determinadas a taxa de assimilação líquida do carbono (A), a condutância estomática (g_s) e a concentração interna de CO_2 (C_i). As avaliações foram realizadas no terceiro trifólio completamente expandido do ápice para a base das plantas, no folíolo central, entre as 9 e 11 h da manhã.

No solo, aos 62 e 57 dias após a semeadura da soja, respectivamente para as safras 2019/20 e 2020/21, foi determinada a resistência à penetração mecânica (RP) na linha de semeadura. Foram realizadas oito medições por UE, sendo utilizado um penetrômetro digital da marca Falker, modelo PLG 1020, atingindo a profundidade de 0,3 m. Para o monitoramento da umidade volumétrica do solo foram instaladas sondas modelo CS-616 (Campbell Scientific) nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m de profundidade, as quais foram conectadas a um Datalogger modelo CR1000 (Campbell Scientific).

A produtividade de grãos da soja foi quantificada através da colheita manual de uma área de 8 m² por UE. Os valores de precipitação pluviométrica e temperatura diária do ar (Figura 3) foram obtidos da Estação Meteorológica Automática do 8º Disme/Inmet, a qual está localizada a 600 m do local de instalação do experimento.

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de pressuposições do modelo matemático. A análise da variância foi realizada via teste F. Quando significativas, as médias foram submetidas ao teste de Scott Knott a 5% de probabilidade de erro através do pacote estatístico SISVAR 5.3.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Safra agrícola 2019/20

Em função do histórico de compactação da área, houve influência dos manejos do solo sobre a RP mecânica (Figura 1A). Logo, a HS (desencontrada ou associada ao MAS) na semeadora e a escarificação na entressafra foram eficientes na descompactação do solo na linha de cultivo, não sendo observados até 0,2 m de profundidade valores de RP superiores a 1,3 MPa. Por outro lado, os manejos SPS+DD e grade aradora+DD praticamente não alteraram a estrutura original do solo, apresentando já na profundidade de 0,1 m RP superior a 2 MPa, valor esse considerado restritivo ao adequado desenvolvimento das culturas agrícolas (TAYLOR et al., 1966; KAISER et al., 2009; BENGOUGH et al., 2010).

Em seguida, os manejos com mobilização do solo em profundidade (HS+MAS, escarificado+DD e subsolado+DD) viabilizaram o acréscimo no comprimento (72%), na área

superficial (57%) e no volume relativo (51%) de raízes quando comparados ao SPS+DD (Tabela 2). Já a grade aradora+DD na semeadora não diferiu significativamente dos melhores manejos para os parâmetros de morfologia de raiz. Contudo, nesse tratamento o sistema radicular das plantas se concentrou na camada superficial do solo (0 a 0,15 m de profundidade), com redução média de 27% (5,9 cm) no comprimento da raiz principal (CRP).

De acordo com Ramos et al. (2010), a compactação do solo exerce marcante influência no desenvolvimento radicular das plantas soja. Nesse sentido, Bengouh et al. (2010) citam que a capacidade de expansão das raízes reduz quando a RP e a densidade do solo aumentam. Isso porque o alongamento radicular é dependente da pressão hidrostática no interior das células da raiz, sendo necessário que a mesma supere as forças de atrito e coesão impostas pelas partículas de solo. Assim, quanto maior o grau de compactação, maiores serão os custos metabólicos necessários para a exploração do perfil do solo pelo sistema radicular das plantas (COLOMBI et al., 2018; WANG et al., 2019).

Além disso, em solos típicos de terras baixas, limitações no fluxo de água resultam em menor disponibilidade de oxigênio no perfil do solo. Como consequência, há o acúmulo de CO₂, etileno e elementos potencialmente tóxicos (ferro e manganês) ao desenvolvimento radicular das plantas em profundidade (THOMAS et al., 2005). Equipamentos que rompem a camada de maior limitação física podem viabilizar que um adequado conteúdo de oxigênio seja reestabelecido mais rapidamente no solo após precipitações elevadas, trazendo benefícios ao desenvolvimento de raízes e nódulos (SARTORI et al., 2016).

No presente estudo, na linha de semeadura, durante os 118 dias de monitoramento da umidade volumétrica do solo na camada de 0,1 a 0,2 m de profundidade, em apenas 19% deles houve espaço de aéreo igual ou superior a 0,1 m³ m⁻³ no manejo SPS+DD, o que contrasta com os valores de 83, 60 e 35% observados nos tratamentos SPS+HS+MAS, escarificado+DD e subsolado+DD, respectivamente (Figura 2). Como exemplo, pode-se destacar o dia 08 de fevereiro de 2020, onde 76 h após o início da irrigação por superfície (solo completamente saturado) já era possível observar espaço aéreo superior a 0,1 m³ m⁻³ no manejo com escarificação. No SPS+DD essa condição foi alcançada apenas 135 h após, resultando em 2,5 dias a mais de estresse hídrico por déficit de oxigênio no solo quando comparado ao manejo supracitado.

Por outro lado, na camada de 0,0 a 0,1 m de profundidade, praticamente não se observou dias com espaço aéreo inferior aos 10% recomendado por Vomocil e Flocker (1961). Todavia, nesse estrato de solo houve maior oscilação no volume de água disponível quando comparada a camada mais profunda. Como resultado, as plantas com menor

desenvolvimento radicular em profundidade (SPS+DD e grade aradora+DD) ficaram mais suscetíveis aos períodos de deficiência hídrica, os quais foram frequentes durante a safra agrícola 2019/20 (Figura 3A).

No estabelecimento inicial (Tabela 2), os sistemas SPS+DD e grade aradora+DD apresentaram redução na PIP quando comparados aos demais manejos, com 12,7 e 17,1 plantas m^2 , respectivamente. Esses resultados podem ser atribuídos em parte à precipitação de 39,2 mm ocorrida no 2º, 3º e 4º dias após a semeadura da soja (Figura 3A), a qual associada a limitação no fluxo de água em profundidade pode ter prolongado o período de tempo com restrição de oxigênio para a germinação das sementes.

No seguimento do cultivo, o limitado acesso à água impactou negativamente os parâmetros fisiológicos nos tratamentos que mantiveram as restrições de ordem física do solo. Conforme apresentado na Tabela 4, o aprofundamento radicular promovido pela escarificação (21,5 cm), HS+MAS (18,3 cm) e subsolagem (16,9 cm) proporcionou incremento na taxa de assimilação líquida do carbono (A), na condutância estomática e na concentração interna de CO_2 quando comparado aos manejos SPS+DD e grade aradora+DD.

De acordo com Anjum et al. (2011), sob restrição hídrica as plantas fecham os estômatos para diminuir a perda de água via transpiração, o que reduz a condutância estomática e a difusão do CO_2 intracelular para os cloroplastos. Além disso, o fechamento estomático inibe a transferência de elétrons livres para o NADP+, resultando na formação de espécies reativas de oxigênio que podem inibir a síntese proteica, oxidar pigmentos fotossintéticos e ocasionar a lipoperoxidação da plasmalema (CHAVARIA et al., 2015; TAIZ et al., 2017). O aumento da temperatura foliar é outro reflexo negativo da redução da condutância estomática, uma vez que a perda de água via transpiração é uma das formas da planta dissipar energia, podendo a ineficiência do processo gerar danos ao aparato fotossintético (LI et al., 2004).

Nesse contexto, cabe destacar que apesar da elevada demanda atmosférica (ETO de $5,42 \text{ mm dia}^{-1}$) no dia da medição dos parâmetros fisiológicos, a ETC da soja ainda não era máxima, visto que as plantas estavam no estágio fenológico V6/V7 e apresentavam área foliar reduzida (dados não apresentados). No solo, a umidade volumétrica era de 0,22 e 0,18 $m^3 m^{-3}$ na camada de 0,0 a 0,1 m e 0,32 e 0,26 $m^3 m^{-3}$ na camada de 0,1 a 0,2 m de profundidade (Figura 2), respectivamente para os tratamentos SPS+DD e escarificado+DD. Isto é, apesar da menor disponibilidade hídrica no manejo com mobilização do solo em profundidade, a planta foi capaz de acessar um maior volume de água via incremento da exploração do solo pelo sistema radicular, tornando-se mais resiliente aos períodos de restrição hídrica.

No desenvolvimento de plantas (Tabela 3), a escarificação se sobressaiu dos demais para o parâmetro MSPA em V7/V8, seguido da HS desencontrada, HS+MAS e subsolado+DD. Em contrapartida, em R5.1 não foi verificado diferença significativa entre os tratamentos. Possivelmente, este resultado está relacionado à menor PIP nos manejos SPS+DD e grade aradora+DD, dado que o aumento na área disponível por planta reduz a competição intraespecífica pelos fatores de crescimento. Contudo, Cunha (2018) destaca que a plasticidade das plantas de soja nem sempre compensa a perda das mesmas, especialmente quando as condições de desenvolvimento são limitantes, a exemplo da compactação do solo. A estatura e a nodulação seguiram tendência semelhante, porém a mantiveram no enchimento de grãos.

Esses resultados são reflexos da capacidade de cada manejo em atenuar os prejuízos oriundos da compactação do solo. Conforme Bengough et al. (2010), o impedimento físico ao crescimento de raízes, associado à drenagem deficiente resultam na redução da capacidade de absorção de água e nutrientes pelas plantas. A restrição no desenvolvimento radicular provoca ainda o aumento da produção de ácido abscísico nas raízes, o qual quando exportado para a parte aérea é responsável pela redução da capacidade fotossintética (TAIZ et al., 2017). Além disso, a FBN também pode ser afetada pela reduzida difusão de O_2 em solos com baixa porosidade de aeração (KASCHUK et al., 2010), visto que o processo chave de redução do N_2 atmosférico a NO_3^- é catalisado pela enzima nitrato redutase, a qual é extremamente sensível a baixos níveis de O_2 (AMARANTE, L. & SODEK, L., 2006)

A melhoria dos parâmetros físicos do solo e conseqüentemente do desenvolvimento das plantas (crescimento radicular, nodulação e parâmetros fisiológicos) refletiram-se na produtividade de grãos da soja. O tratamento escarificado+DD foi estatisticamente superior aos demais, com produtividade de 5.362 kg ha^{-1} , seguido do subsolado+DD (4.997 kg ha^{-1}), SPS+HS+MAS (4.866 kg ha^{-1}) e SPS+HS desencontrada (4.860 kg ha^{-1}), os quais não diferiram significativamente entre si. Como piores propostas aparecem os manejos SPS+DD e grade aradora+DD, com redução média de 20 sc ha^{-1} em relação ao escarificado+DD. Cabe ressaltar que devido a irregularidade na distribuição de chuvas (Figura 3A) no primeiro ano de estudo, foram realizadas duas irrigações por superfície, uma no dia 08 de fevereiro e outra no dia 04 de março 2020, o que viabilizou as elevadas produtividades obtidas no experimento, e que ao mesmo tempo, pode ter abrandado as diferenças entre os manejos de solo.

4.5.2 Safra agrícola 2020/21

No segundo ano de estudo, o azevém na entressafra do cultivo de verão não influenciou significativamente a RP na linha de semeadura (Figura 1C). Assim, pode-se afirmar que o sistema radicular das plantas de cobertura não foi eficiente em viabilizar melhorias na estrutura física do solo (SPS+DD e SPS+HS+MAS) em apenas um ciclo de cultivo, bem como não foi capaz de auxiliar na manutenção das alterações oriundas dos manejos mecânicos do solo na entressafra de 2019 (subsolagem e escarificação).

Na semeadora, a HS na deposição do fertilizante reduziu a RP até sua profundidade de atuação, isto é, 0,2 m. Entre os manejos de entressafra, o Escarificado em 2020 se sobressaiu dos demais, não sendo observado até 0,3 m valores de RP superiores a 1,4 MPa. Já o Esc. em 2019, mesmo 15 meses após a intervenção mecânica do solo, ainda apresentava na camada de 0,1 a 0,3 m valores de RP inferiores aos obtidos no tratamento SPS+DD, reforçando a hipótese de que as alterações na estrutura física do solo são perceptíveis por mais de uma safra agrícola.

Esses resultados corroboram com os obtidos por Prazeres et al. (2020), onde independentemente da espécie de cobertura (aveia preta, trigo e nabo) utilizada na entressafra, 12 meses após a escarificação de um Cambissolo Húmico, ainda era perceptível a redução da RP quando comparada a área não escarificada, embora seus valores tenham aumentado 53% em relação a análise realizada logo após o manejo. No presente estudo, o aumento médio (camada de 0,0 a 0,3 m) da RP entre janeiro e dezembro de 2020 foi de aproximadamente 31% no tratamento Esc. em 2019+DD.

Como consequência, assim como na safra 2019/20, houve influência dos manejos de solo no CRP da soja no estágio fenológico R5.1. O tratamento SPS+DD apresentou CRP médio de 15,5 cm, 52% inferior ao SPS+HS+MAS. Assim, percebe-se que o desenvolvimento radicular das plantas é limitado, dentre outros parâmetros, pelo aumento da RP, o qual no respectivo manejo chegou a 2,4 MPa já a 0,1 m de profundidade. O azevém na entressafra não influenciou o CRP da soja.

Para a PIP houve interação entre os fatores estudados (Tabela 2). O tratamento Esc. em 2020+DD associado ao azevém na entressafra obteve estabelecimento de 15,3 plantas m^{-2} , o que representou um decréscimo de 45%, ou 69 mil plantas ha^{-1} em comparação a média dos demais. Esse resultado está, sobretudo, atrelado à condição de solo no momento da semeadura. Cabe lembrar que a escarificação em 2020 foi realizada em área que apresentava cerca de 8.700 $kg\ ha^{-1}$ de MS de azevém (parte aérea e sistema radicular). Como resultado, houve a formação de grandes agregados de solo sob a superfície, os quais afetaram negativamente o contato semente-solo, dificultando a absorção da água necessária para o

processo de germinação das sementes (ANEXO M). Além disso, a presença de palhada em superfície (4.317 kg ha^{-1}) aumentou a retenção de umidade no solo, o que resultou no atraso de 9 dias no processo de semeadura da soja. Em área de terras baixas, atrasos na semeadura significam o aumento do risco de excesso hídrico em função da próxima precipitação.

No desenvolvimento de plantas (Tabela 3), não foi observado interação entre os fatores analisados. De maneira geral, a melhoria do ambiente radicular, aqui representado pela redução da RP em profundidade, viabilizou o aumento da MSPA, da MSN e da estatura de plantas nos tratamentos Esc. em 2020+DD e SPS+HS+MAS. Ademais, a escarificação realizada em setembro de 2019, além de não diferir estatisticamente dos melhores manejos, apresentou ainda acréscimo de 55% na MSPA em V7/V8 e de 37% na MSN em R5.1 quando comparado ao SPS+DD, o qual manteve o solo mais próximo do seu estado original.

Quanto ao uso do azevém na entressafra, houve diferença estatística apenas para a MSN. Na média, os tratamentos com palhada em superfície apresentaram incremento de 41% na massa seca de nódulos. Esses resultados vão ao encontro dos observados por Cassol (2017), onde a presença de cobertura vegetal de azevém viabilizou a redução nas flutuações de temperatura e umidade na camada superficial do solo, proporcionando o incremento do número de nódulos por planta. De acordo com o mesmo autor, a redução chegou a 40% com o acréscimo médio de apenas 1°C na camada de 0 a 0,05 m de profundidade.

Na safra 2020/21, os parâmetros fisiológicos foram avaliados somente no Fator A, visto as exigências do equipamento e o grande número de UE. Na referida safra, a distribuição de precipitações foi mais uniforme ao longo do ciclo da cultura quando comparada a safra 2019/20. Contudo, o menor volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas, associado a períodos de elevada demanda evapotranspirativa (Figura 3B) impactaram negativamente os parâmetros fisiológicos no tratamento SPS+DD. Nessa perspectiva, houve redução de 33% na taxa de assimilação líquida do carbono, 89% na condutância estomática e 22% na concentração interna de CO_2 quando comparada a média dos demais tratamentos, os quais não diferiram entre si.

A resposta das plantas aos estresses hídricos varia de acordo com a duração e a intensidade desses eventos, bem como com a fase de desenvolvimento das plantas. Contudo, a literatura mostra que até mesmo pequenos estresses, quando somados, são suficientes para prejudicar o desenvolvimento morfológico das plantas (FERRARI et al., 2015), assim como foi verificado para as variáveis MSN, MSPA e estatura de plantas no presente estudo.

Para a produtividade de grãos não houve interação entre os fatores analisados. Já para os manejos de solo, a escarificação realizada no mesmo ano do cultivo (Esc. em 2020+DD)

promoveu maior produtividade quando comparado aos demais manejos, com 5.608 kg ha⁻¹. Na sequência, e não diferindo entre si, aparecem os tratamentos SPS+HS+MAS, Esc. em 2019+DD, Sub. em 2019+DD e SPS+HS desencontrada. O uso do DD na semeadora sem manejo prévio do solo foi a pior proposta avaliada.

Outra forma de ver os resultados é através da soma das produtividades obtidas em cada um dos tratamentos nas duas safras analisadas. Em ordem decrescente de produção acumulada aparecem o Esc. no ano+DD (183 sc ha⁻¹), Esc. em 2019+DD (174 sc ha⁻¹), SPS+HS+MAS (167 sc ha⁻¹), Sub. em 2019 (165 sc ha⁻¹) e SPS+DD (142 sc ha⁻¹). Ao analisar esses resultados, pode-se inferir que o aproveitamento da escarificação para uma segunda safra é uma alternativa interessante, e que proporcionou incremento de 32 sc ha⁻¹ quando comparado ao manejo SPS+DD. A utilização do azevém na entressafra não influenciou significativamente a produtividade de grãos da soja, corroborando com os resultados observados por Fin et al. (2018).

As limitações de ordem física do solo parecem ser o principal gargalo no incremento da produtividade da soja em terras baixas. Assim, reduzir o tempo em que as plantas permanecem sujeitas a estresses hídricos é crucial. A escarificação do solo é a forma mais eficiente de fazê-lo, além disso, seu efeito benéfico sobre o desenvolvimento de plantas é perceptível por pelo menos duas safras agrícolas, o que viabiliza a diluição de operações e custos. Na semeadora, a HS é a melhor alternativa. A interação entre plantas de cobertura e manejos do solo deve ser melhor compreendida, especialmente através da utilização de outras espécies vegetais. A época de dessecação também deve ser analisada com cautela, pois a massa seca remanescente pode atrasar a época de semeadura, ou mesmo, prejudicar o estabelecimento inicial das plantas de soja em terras baixas.

4.6 CONCLUSÕES

A escarificação realizada no mesmo ano da semeadura é o manejo mais eficiente na mitigação dos efeitos adversos da compactação do solo em terras baixas.

O manejo sem preparo do solo na entressafra associado ao disco duplo na semeadora reduz o desenvolvimento radicular, a capacidade fotossintética e a produtividade de grãos da soja em área de terras baixas com camada compactada.

Parte dos benefícios advindos da escarificação do solo no desenvolvimento das plantas de soja permanece por mais de uma safra, o que viabiliza resultados de produtividade equiparáveis a haste sulcadora na semeadora.

O azevém, em uma única safra agrícola, não influencia na persistência de alterações físicas do solo e na produtividade de grãos da soja.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

AMARANTE, L.; SODEK, L. Waterlogging effect on xylem sap glutamine of nodulated soybean. **Biologia Plantarum**, n.50, v.3, p.405-410, 2006. DOI: 10.1007/s105350060057654.

ANJUM, S.A. et al. Morphological, physiological and biochemical responses plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, v.6, n.9, p.2026-2032, 2011. DOI: 10.5897/AJAR10.027.

BAMBERG, A.L. et al. Densidade de um Planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.33, p.1079-1086, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000500001.

BENGOUGH, A.G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.1, p.59-68, 2010. DOI:10.1093/jxb/erq350.

BJÖRKLUNDA, M.M. et al. Effects of subsoil compaction on hydraulic properties and preferential flow in a Swedish clay soil. **Soil & Tillage Research**, v.156, p.91-98, 2016. DOI: 10.1016/j.still.2015.09.013.

BUENO, M.V. et al. Improving the drainage and irrigation efficiency of lowland soils: land-forming options for southern Brazil. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.146, p.04020019, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001483.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, v.33, p.242-249, 2010. DOI:10.1016/j.eja.2010.06.002.

CASSOL, G.V. **Sistema de implantação, irrigação e alterações fisiológicas de plantas de soja sob cultivo em terras baixas**. Santa Maria, 2017. 140f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2017.

CEREZINI, P. et al. Gas exchanges and biological nitrogen fixation in soybean under water restriction. **American Journal of Plant Sciences**, n.5, p.4011-4017, 2014. DOI: 10.4236/ajps.2014.526419.

CHAVARRIA, G. et al. Restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciência Rural**, v.45, n.8, p.1387-1393, 2015. DOI: 10.1590/0103-8478cr20140705.

CIAMPITTI, I.A.; SALVAGIOTTI, F. New insights into soybean biological nitrogen fixation. **Agronomy Journal**, v.110, p.1185-1196, 2018. DOI: 10.2134/agronj2017.06.0348.

COELHO, L.L. et al. Ryegrass management in lowland areas on the establishment and development of soybean in succession. **Revista Brasileira Ciências Agrárias**, v.15, n.3, e7002, 2020. DOI: 10.5039/agraria.v15i3a7002.

COELHO, L.L. et al. Seeding furrow opening mechanisms and the soybean planting in lowland areas. **Ciência Rural**, v.50:6, e20190870, 2020. DOI: 10.1590/0103-8478cr20190870.

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**, v.626, p.1026-1035, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.129.

CUNHA, V.S. **Aspectos agronômicos e econômicos da distribuição de plantas na cultura da soja**. Santa Maria, 2018. 97f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2018.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: State University of Science and Technology, 1977. 11p. (Special report, 80).

FERRARI, E. et al. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Nativa**, v.3, n.1, p.67-77, 2015. DOI: 10.14583/2318-7670.v03n01a12.

FIN, S.S. et al. Duration of the effects of scarification and raised bed associated with vegetation cover on soybean yield on an Alfisol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.11, p.1230-1238, 2018. DOI: 10.1590/s0100-204x2018001100005.

FIORESI, D.A. et al. Desempenho de um trator agrícola em operações de preparo de solo no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v.7, n.3, p.288-295. 2019. DOI: 10.31413/nativa.v7i3.7554.

GUBIANI, P.I. et al. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.42, e0170282, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbc20170282.

GOULART, R.Z.; REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M.F. Cropping poorly-drained lowland soils: Alternatives to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**, v.177, 102715, 2020. DOI: 10.1016/j.agsy.2019.102715.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P.; DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Advances in Agronomy**, v.42, p.311-338, 1989. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60528-3.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M.A.T. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field Crops Research**, v.65, p.151-164, 2000. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00084-2.

IRGA. **Soja cultivada em rotação com arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul**. Disponível em: < <http://admin.irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202107/07121429-soja-productividades-municipais-safra-2020-21.pdf>>. Acesso em: 11 de setembro de 2021.

- KAISER, D.R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.845-855, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400009.
- KASCHUK, G. et al. Differences in photosynthetic behaviour and leaf senescence of soybean (*Glycine max* [L.] Merrill) dependent on N₂ fixation or nitrate supply. **Plant Biology**, v.12, p.60-69, 2010. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2009.00211.x.
- LI, F.; KANG, S.; ZHANG, J. Interactive effects of elevated CO₂, nitrogen and drought on leaf area, stomatal conductance, and evapotranspiration of wheat. **Agricultural Water Management**, v.67, p.221-233, 2004. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.01.005.
- MWAMLIMA, R.L.H.; OUMA, J.P.; CHERUIYOT, E.K. Soybean (*Glycine max* (L) Merrill) root growth and nodulation responses to different soil moisture. **Journal Crop Science Biotechnology**, v.22, n.2, p.153-159, 2019. DOI: 10.1007/s12892-019-0045-0.
- PEDROTTI, A. et al. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil & Tillage Research**, v.80, p.115-123, 2005. DOI: 10.1016/j.still.2004.03.003.
- PRAZERES, M.P. et al. Scarification in no-tillage: soil physics and plant development. **Scientia Agraria**, v.19, n.2, p.151-160, 2020. DOI: 10.18188/sap.v19i2.23439.
- RAMOS, J.C. et al. Morphological characteristics of soybean root apexes as indicators of soil compaction. **Scientia Agrícola**, v.67, n.6, p.707-712, 2010. DOI: 10.1590/S0103-90162010000600013.
- RIBAS, G.G. et al. Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. **Agricultural Systems**, v.188, 103036, 2021. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103036.
- SAIRAM, R.K. et al. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. **Biologia Plantarum**, v.52, n.3, p.401-412, 2008. DOI: 10.1007/s10535-008-0084-6.
- SANTOS, H.G.DOS et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [S.l.]: Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SARTORI, G.M.S. et al. Growth and development of soybean roots according to planting management systems and irrigation in lowland areas. **Ciência Rural**, v.46, n.9, p.1572-1578, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20151579.
- SCHNEIDER, F. et al. The effect of deep tillage on crop yield - What do we really know? **Soil & Tillage Research**, v.174, p.193-204, 2017. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.005.
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Art., 2017. 888p.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, v.102, n.1, p.18-22, 1966. DOI: 10.1097/00010694-196607000-00002.

THOMAS, A.L.; GUERREIRO, S.M.C.; SODEK, L. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean. **Annals of Botany**, n.96, p.1191-1198, 2005. DOI: 10.1093/aob/mci272.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)**, v.4, p.242-246, 1961. DOI: 10.13031/2013.41066.

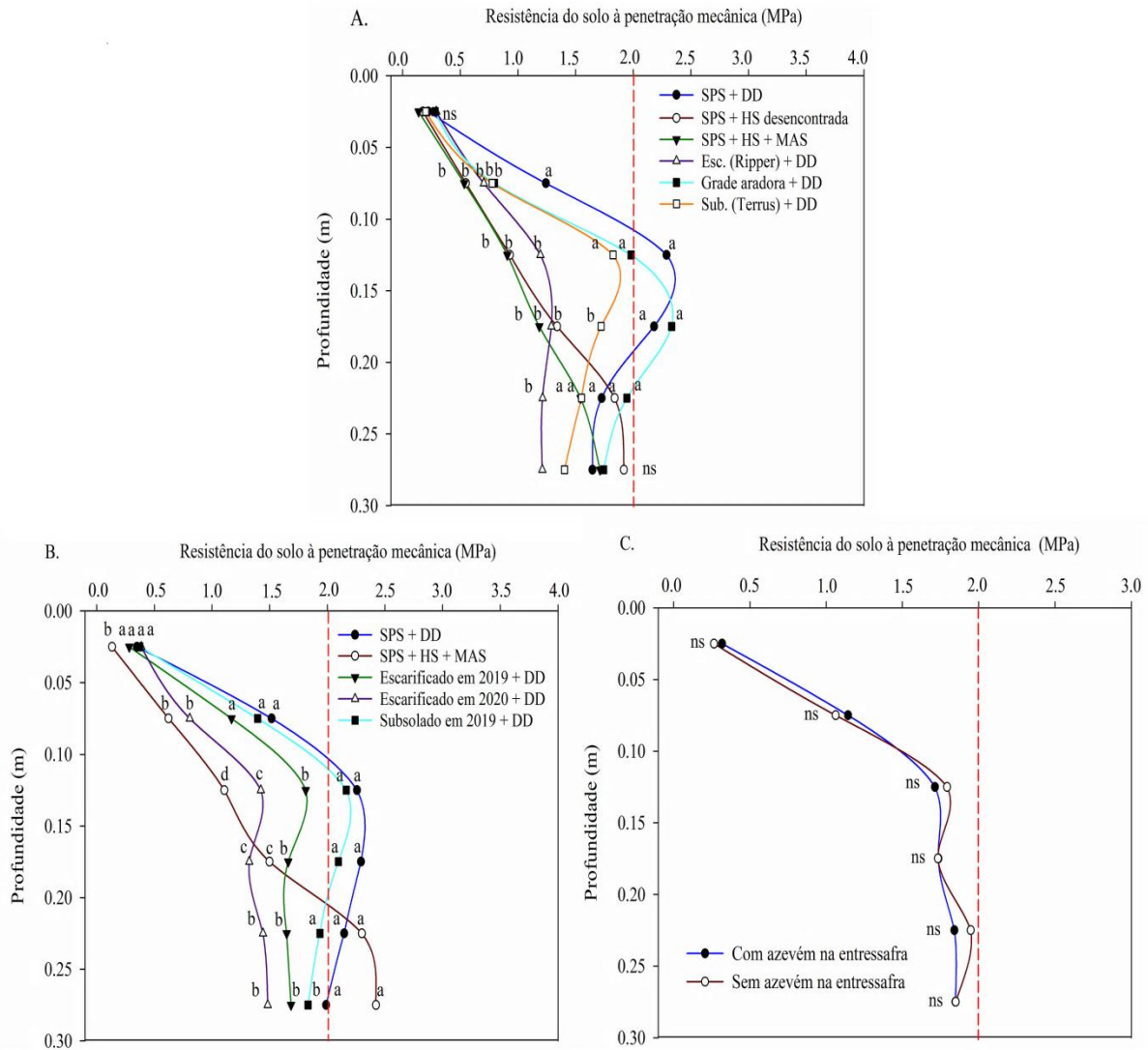
WANG, M. et al. Effects of soil compaction on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soybean seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, v.26, p.22835-22845, 2019. DOI: 10.1007/s11356-019-05606-z.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da área de instalação do experimento no mês de setembro de 2019. Santa Maria, RS. 2021.

Prof. (m)	pH água 1:1	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC efet.	Saturação (%)		MO (%)	S	P	K
							Al	Bases				
		cmol _c dm ⁻³						mg dm ⁻³				
0,0 a 0,1	5,7	5,4	2,1	0,0	3,5	7,6	0,0	68,6	2,4	10,4	24,5	60
0,1 a 0,2	5,8	5	2,3	0,0	2,8	7,3	0,0	72,2	1,3	7,6	9,0	20
0,2 a 0,3	5,0	3	1,4	1,1	6,9	5,6	19,6	49,1	1	9,9	4,6	16
Prof.	Areia	Silte		Argila		Ds	Macro.	CC	PMP*			
	-----g kg ⁻¹ -----					Mg m ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----					
0,0 a 0,1	267	477		256		1,43	0,09	0,34	0,13			
0,1 a 0,2	259	487		254		1,60	0,06	0,33	0,14			
0,2 a 0,3	230	542		228		1,58	0,05	0,34	0,13			

CTC: capacidade de troca de cátions. Ds: densidade do solo. Macro: macroporosidade. CC: capacidade de campo. PMP: ponto de murcha permanente [* Obtido pela equação proposta por Klein et al. (2008)].

Figura 1 - Resistência à penetração mecânica (RP) na linha de semeadura em função de manejos do solo e do uso de azevém na entressafra em área de terras baixas. Santa Maria, RS. 2021. A umidade volumétrica na avaliação de RP era de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente para as safras 2019/20 e 2020/21 (camada de 0 a 0,3 m de profundidade). DD: disco duplo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação de solo. ^{ns} não significativo. (A) safra 2019/20; (B) fator A safra 2020/21 e (C) fator D safra 2020/21.



Fonte: Autor.

Tabela 2 - População inicial de plantas (PIP) e comprimento da raiz principal (CRP) nos estádios fenológicos V7/V8 e R5.1 e comprimento (C), área superficial (AS), volume relativo (VR) e diâmetro médio (DM) do sistema radicular da soja em função de manejos do solo e do uso de azevém em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.

Manejos do solo	Safra 2019/20			
	PIP		CRP (cm)	
	(plantas m ⁻²)		V7/8	R5.1
SPS + disco duplo (DD)	12,7 c ⁽¹⁾		11,7 c	12,6 d
SPS + HS desencontrada	20,9 a		-	-
SPS + HS + MAS	22,1 a		18,3 b	22,7 a
Escarificado (Ripper) + DD	20,2 a		21,5 a	24,3 a
Grade aradora + DD	17,1 b		12,9 c	16,2 c
Subsolado (Terrus) + DD	19,7 a		16,9 b	19,2 b
Média	18,8		16,3	19,0
CV (%)	13,0		15,5	12,2
Tratamentos	C (cm)	AS (cm ²)	VR (cm ³)	DM (mm)
SPS + disco duplo (DD)	2017 b	414 b	7,3 b	0,70 a
SPS + HS + MAS	3476 a	684 a	11,1 a	0,63 b
Escarificado (Ripper) + DD	3649 a	660 a	10,9 a	0,61 b
Grade aradora + DD	3267 a	661 a	10,5 a	0,67 a
Subsolado (Terrus) + DD	3323 a	613 a	11,1 a	0,64 b
Média	3146,7	606,5	10,2	0,65
CV (%)	25,7	20,4	19,2	6,2
Safra 2020/21				
Manejos do solo	PIP (plantas m ⁻²)		CRP (cm)	
	Com azevém	Sem azevém	V7/8	R5.1
SPS + disco duplo (DD)	21,8 bA	19,9 cA	-	15,5 c
SPS + HS desencontrada	23,3 aA	22,2 aA	-	-
SPS + HS + MAS	24,8 aA	24,9 bA	-	23,6 a
Escarificado em 2019 + DD	22,3 bA	20,4 cA	-	21,1 b
Escarificado em 2020 + DD	15,3 cB	22,6 bA	-	21,0 b
Subsolado em 2019 + DD	20,5 bA	21,5 cA	-	19,4 b
Planta de cobertura				
Com azevém	-	-	-	20,0 ^{ns}
Sem azevém	-	-	-	20,2
Média	21,6		-	20,1
CV (%)	8,0		-	14,5

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), em maiúsculo na linha e em minúsculo na coluna. ^{ns} não significativo. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação de solo.

Tabela 3 - Massa seca da parte aérea (MSPA), estatura de plantas e massa seca de nódulos (MSN) da soja nos estádios fenológicos V7/8 e R5.1 em função de manejos do solo e do uso de azevém em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.

Safrá 2019/20						
Manejos do solo	MSPA (g planta ⁻¹)		Estatura (cm)		MSN (mg planta ⁻¹)	
	V7/8	R5.1	V7/8	R5.1	V7/8	R5.1
SPS + disco duplo (DD)	5,1 c ⁽¹⁾	26,9 ^{ns}	26,7 c	72,8 e	97,5 c	589,9 b
SPS + HS desencontrada	7,5 b	31,4	31,7 b	87,3 c	229,1 a	990,3 a
SPS + HS + MAS	7,6 b	30,4	31,4 b	89,9 c	187,0 b	960,5 a
Escarificado (Ripper) + DD	10,2 a	33,6	35,1 a	102,9 a	228,1 a	827,1 a
Grade aradora + DD	6,1 c	28,4	28,2 c	82,2 d	115,4 c	717,7 b
Subsolado (Terrus) + DD	7,5 b	35,8	35,3 a	95,6 b	185,1 b	910,5 a
Média	7,3	31,1	31,2	88,4	173,4	832,6
CV (%)	16,6	15,6	6,3	3,9	21,4	17,9
Safrá 2020/21						
Manejos do solo	MSPA (g planta ⁻¹)		Estatura (cm)		MSN (mg planta ⁻¹)	
	V7/8	R5.1	V7/8	R5.1	V7/8	R5.1
SPS + disco duplo (DD)	7,4 c	40,3 ^{ns}	32,2 b	135,5 ^{ns}	-	604,8 b
SPS + HS desencontrada	-	-	-	-	-	-
SPS + HS + MAS	9,8 b	41,5	38,7 a	140,0	-	872,6 a
Escarificado em 2019 + DD	11,5 a	46,6	38,8 a	137,7	-	826,5 a
Escarificado em 2020 + DD	11,5 a	47,5	37,9 a	136,2	-	866,4 a
Subsolado em 2019 + DD	9,8 b	47,7	36,4 a	138,7	-	674,9 b
Planta de cobertura						
Com azevém	10,0 ^{ns}	46,2 ^{ns}	35,7 ^{ns}	139,3 ^{ns}	-	899,2 a
Sem azevém	9,9	43,3	37,9	135,8	-	638,4 b
Média	10,0	44,7	36,8	137,6	-	768,8
CV (%)	18,5	20,0	8,6	6,9	-	28,9

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). ^{ns} não significativo. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação de solo.

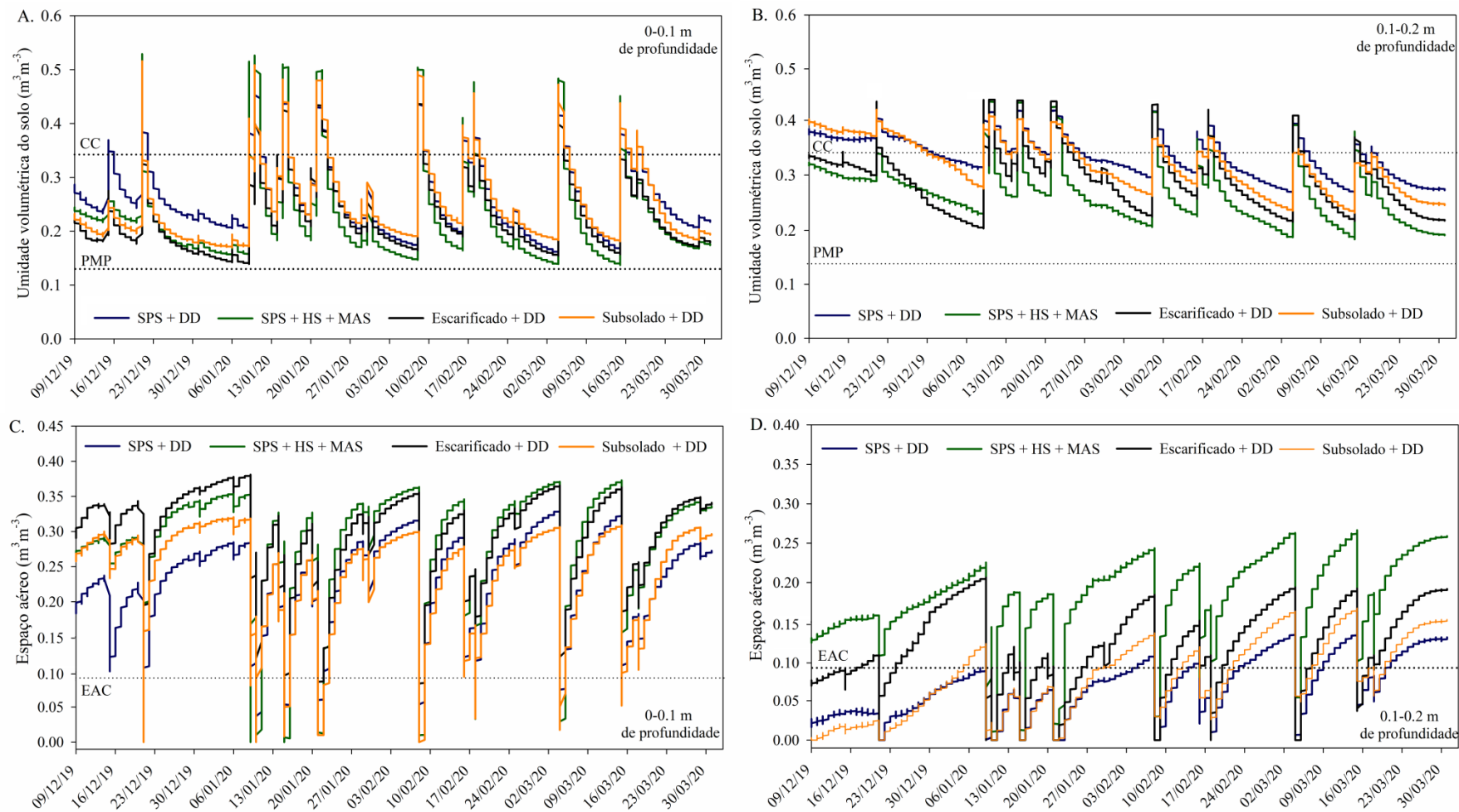
Tabela 4 - Taxa de assimilação líquida do carbono (A), condutância estomática (GS), concentração interna de CO₂ (CI) e produtividade de grãos da soja em função de manejos do solo e do uso de azevém em área de terras baixas compactada. Santa Maria, RS. 2021.

Safrá 2019/20				
Manejos do solo	A	GS	CI	Prod. (kg ha ⁻¹)
	($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)	
Estádio fenológico V6/V7				
SPS + disco duplo (DD)	18,7 b ⁽¹⁾	322,0 c	226,9 b	3.959 c
SPS + HS desencontrada	23,4 a	438,7 b	251,5 b	4.860 b
SPS + HS + MAS	22,7 a	431,2 b	252,6 b	4.866 b
Escarificado (Ripper) + DD	23,6 a	561,9 a	273,6 a	5.362 a
Grade aradora + DD	20,6 b	351,4 c	244,9 b	4.334 c
Subsolado (Terrus) + DD	24,7 a	579,2 a	271,1 a	4.997 b
Média	22,2	443,7	252,9	4.729
CV (%)	10,1	14,4	7,7	7,6
Safrá 2020/21				
Manejos do solo	A	GS	CI	Prod. (kg ha ⁻¹)
	($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)	
Estádio fenológico R5.2				
SPS + disco duplo (DD)	23,3 b	226,7 c	193,6 b	4.585 c
SPS + HS desencontrada	-	-	-	4.996 b
SPS + HS + MAS	32,3 a	412,0 b	228,8 a	5.184 b
Escarificado em 2019 + DD	28,9 a	369,4 b	230,0 a	5.076 b
Escarificado em 2020 + DD	31,9 a	507,5 a	252,5 a	5.608 a
Subsolado em 2019 + DD	-	-	-	4.999 b
Planta de cobertura				
Com azevém	-	-	-	4.967 ^{ns}
Sem azevém	-	-	-	5.183
Média	29,1	378,9	226,2	5075
CV (%)	13,3	17,5	8,37	8,4

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). ^{ns} não significativo.

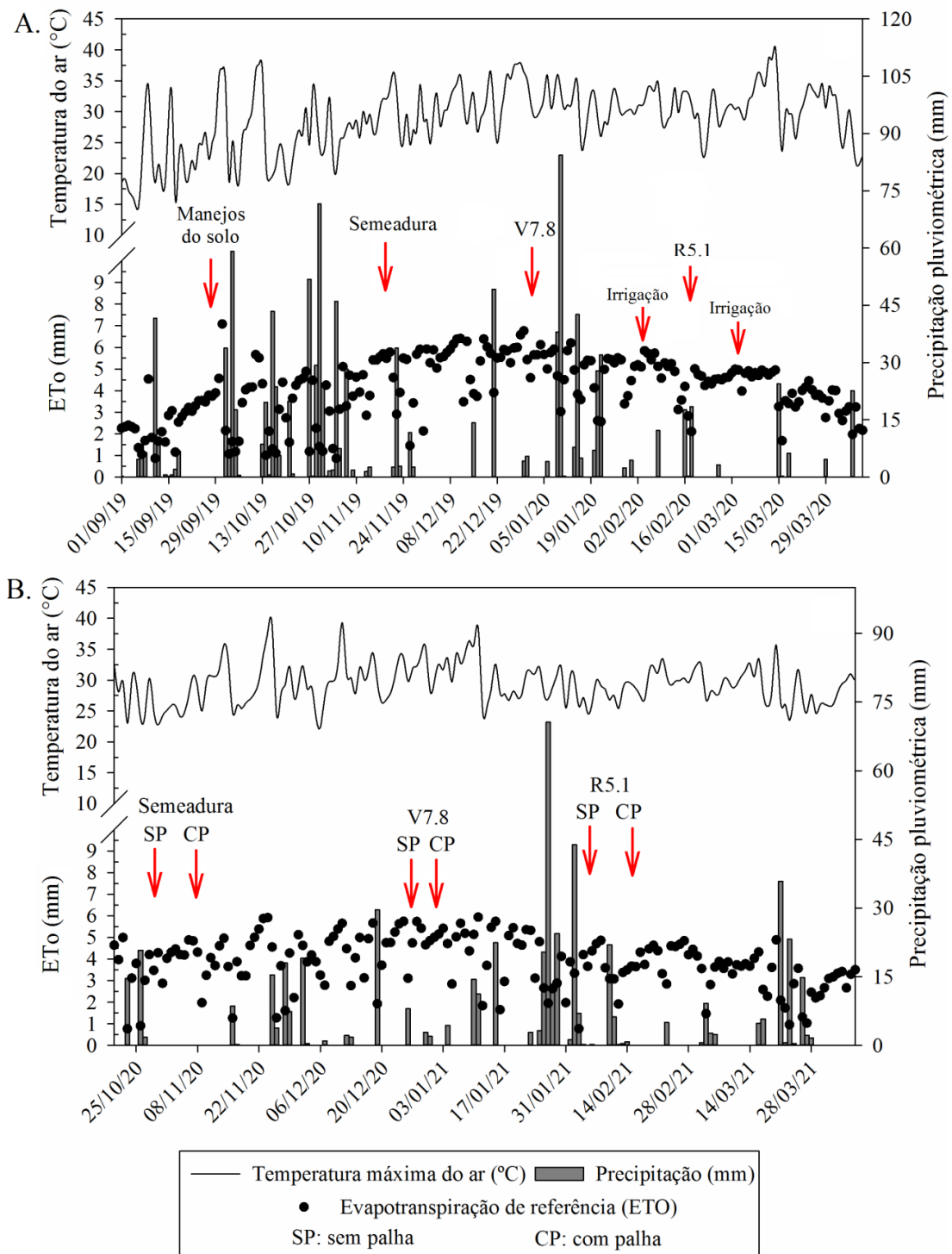
SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação de solo.

Figura 2 - Umidade volumétrica e espaço aéreo do solo nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m de profundidade durante a safra agrícola 2019/20 nos tratamentos SPS+DD, SPS+HS+MAS, escarificado (Ripper)+DD e subsolado (Terrus)+DD em área de terras baixas com camada compactada. Santa Maria, RS. 2021. DD: disco duplo. HS: haste sulcadora. MAS: mecanismo de acomodação do solo. CC: capacidade de campo. PMP: ponto de murcha permanente. EAC: espaço aéreo crítico.



Fonte: Autor.

Figura 3 - Temperatura máxima do ar (°C), precipitação pluviométrica diária (mm) e evapotranspiração de referência durante as safras agrícolas 2019/20 (A) (01/09/2019 a 09/04/2020) e 2020/21 (B) (20/10/20 a 09/04/2021). Santa Maria, RS. 2021.



Fonte: Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para as terras baixas do Rio Grande do Sul, o cultivo da soja representa uma oportunidade ímpar de reverter ao sistema produtivo áreas com elevada infestação de plantas daninhas resistentes e assim, assegurar renda e fluxo de caixa as propriedades rurais. Todavia, em um mercado competitivo e de constante evolução, produzir apenas com o objetivo de recuperar áreas para o arroz irrigado não é sustentável. Portanto, buscar o rendimento máximo em cada hectare de área passa a ser o propósito a ser alcançado. Para isso, compreender as necessidades da cultura é vital.

Nessas áreas, as características de solo que viabilizam o cultivo do arroz irrigado por inundação são as mesmas que predis põe as plantas de soja a estresses e que, em muitos casos limitam o potencial produtivo da cultura. Tecnicamente, a escolha da área deve ser feita de modo a minimizar os riscos de inundação, lembrando que a soja não tolera tal contratempo. Na sequência, identificar as peculiaridades da camada de maior limitação física é fundamental para se obter maior assertividade em relação ao manejo.

Diante do cenário vivenciado por produtores rurais e técnicos, o presente estudo teve três objetivos, sendo eles: quantificar o efeito de manejos do solo e de mecanismos de deposição do fertilizante sobre a qualidade da distribuição de sementes (1); sobre o consumo energético do conjunto mecanizado e parâmetros físicos do solo (2) e acerca do desenvolvimento das plantas de soja em terras baixas (3). Com base nos resultados apresentados no primeiro estudo, é possível constatar que independentemente do manejo de solo e/ou mecanismo de deposição do fertilizante utilizado, é preciso melhorar a qualidade de distribuição de sementes (verticalmente e longitudinalmente), ou então, falharemos na busca por estreitar as lacunas de produtividade. O mecanismo de acomodação do solo desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado (GPAI) parece ser o “ponta pé” inicial na busca por mais assertividade no estabelecimento inicial de plantas, uma vez que reduz desuniformidades na profundidade de deposição das sementes. Na sequência, melhorar o fluxo de água em profundidade reduz o período de tempo em que as mesmas permanecem expostas ao excesso hídrico em decorrência de precipitações elevadas no pós-semeadura, reduzindo a morte de sementes e plântulas.

No Capítulo II, percebe-se que o desenvolvimento radicular da soja está diretamente relacionado às melhorias nos parâmetros físicos do solo. A escolha de como fazê-lo deve levar em consideração as peculiaridades da camada compactada (profundidade e espessura) e a disponibilidade dos equipamentos na propriedade. A escarificação apesar do elevado

consumo de combustível e exigência de potência entrega maior volume de solo (linha e entrelinha) apto para o desenvolvimento radicular das plantas de soja, ou seja, RP inferior a 1,5 MPa e valores de macroporosidade próximos ou superiores a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A HS em profundidade adequada é outra boa alternativa, pois reduz custos e economiza operações quando comparada a escarificação. Já a subsolagem em terras baixas deve ser melhor compreendida, pois além do elevado custo de implantação (aquisição do equipamento e consumo de combustível), deixa dúvidas quanto a eficiência da descompactação em profundidade. Nessa perspectiva, a umidade do solo e o espaçamento entre hastes parecem ser os elementos centrais. Outra opção de redução de despesas é o aproveitamento da escarificação para uma segunda safra agrícola, uma vez que parte dos benefícios advindos da mobilização do solo são mantidos, com destaque para a RP.

O desenvolvimento das plantas de soja está atrelado à capacidade de cada manejo em atenuar os problemas de ordem física do solo (Capítulo III). Assim, os tratamentos com escarificação na entressafra e haste sulcadora na semeadora viabilizaram a redução da RP e a melhoria no fluxo de água e gases na linha de cultivo. O desenvolvimento radicular (comprimento, volume e área superficial) e a nodulação foram alguns dos parâmetros beneficiados pela redução na duração dos períodos de déficit de oxigênio no perfil do solo, com destaque para a camada de 0,1 a 0,2 m de profundidade. Além disso, a maior exploração do perfil do solo pelo sistema radicular viabilizou maior resiliência das plantas aos períodos de deficiência hídrica, com reflexos positivos na fotossíntese (taxa de assimilação de carbono e condutância estomática) e na produtividade de grãos. A escarificação realizada em 2019, ou seja, 15 meses antes da semeadura da soja na safra 2020/21 viabilizou resultados semelhantes aos obtidos nos melhores tratamentos, sendo uma alternativa com um custo-benefício interessante e que, se associado a haste sulcadora na semeadora, pode proporcionar resultados ainda melhores. Cabem nessa lacuna mais estudos.

O azevém em uma única safra agrícola não foi capaz de promover melhorias nos parâmetros físicos do solo, nem mesmo auxiliar na manutenção das alterações oriundas dos manejos de entressafra (escarificação e subsolagem), a qual era uma das hipóteses do trabalho. Apesar de o azevém ser uma importante opção de complementação de renda durante o outono-inverno (pastejo animal, feno, semente), cuidados devem ser tomados com a massa seca residual das plantas no momento da semeadura da soja. Em grande volume, a palha retém umidade no solo e reduz ainda mais as janelas de trabalho mecanizado nessas áreas.

Por fim, cabe lembrar que o planejamento prévio e a adequação das áreas (drenagem, nivelamento de superfície, calagem e etc...) para receber espécies alternativas ao arroz

irrigado são fundamentais no sucesso da diversificação de culturas em terras baixas. Ademais, a capacitação e a motivação constante da equipe de trabalho são cruciais, pois em última instância são as pessoas a campo que definem o sucesso ou o insucesso do que foi idealizado no escritório.

6 CONCLUSÕES

6.1 ARTIGO I

O uso do mecanismo de acomodação associado à haste sulcadora em área sem mobilização previa do solo viabiliza melhor qualidade de distribuição das sementes em profundidade.

O rompimento da camada de maior limitação física do solo proporciona melhor estabelecimento inicial de plantas de soja em terras baixas.

6.2 ARTIGO II

A escarificação reduz a resistência à penetração mecânica e aumenta a macroporosidade do solo na linha e na entrelinha de cultivo, o que se reflete no incremento da produtividade de grãos da soja em terras baixas.

A haste sulcadora aumenta o consumo energético da operação de semeadura, ao passo que atenua as restrições de ordem física do solo para o crescimento radicular da soja quando comparada ao disco duplo na deposição do fertilizante.

O efeito residual da escarificação em um Planossolo Háplico é perceptível por pelo menos 15 meses após a intervenção para os parâmetros resistência à penetração e macroporosidade do solo.

O azevém, em apenas um ano de cultivo, não interfere na manutenção dos atributos físicos do solo e na produtividade de grãos da soja.

6.3 ARTIGO III

A escarificação realizada no mesmo ano da semeadura é o manejo mais eficiente na mitigação dos efeitos adversos da compactação do solo em terras baixas.

O manejo sem preparo do solo na entressafra associado ao disco duplo na semeadora reduz o desenvolvimento radicular, a capacidade fotossintética e a produtividade de grãos da soja em área de terras baixas com camada compactada.

Parte dos benefícios advindos da escarificação do solo no desenvolvimento das plantas de soja permanece por mais de uma safra, o que viabiliza resultados de produtividade equiparáveis a haste sulcadora na semeadora.

O azevém, em uma única safra agrícola, não influencia na persistência de alterações físicas do solo e na produtividade de grãos da soja.

ANEXOS

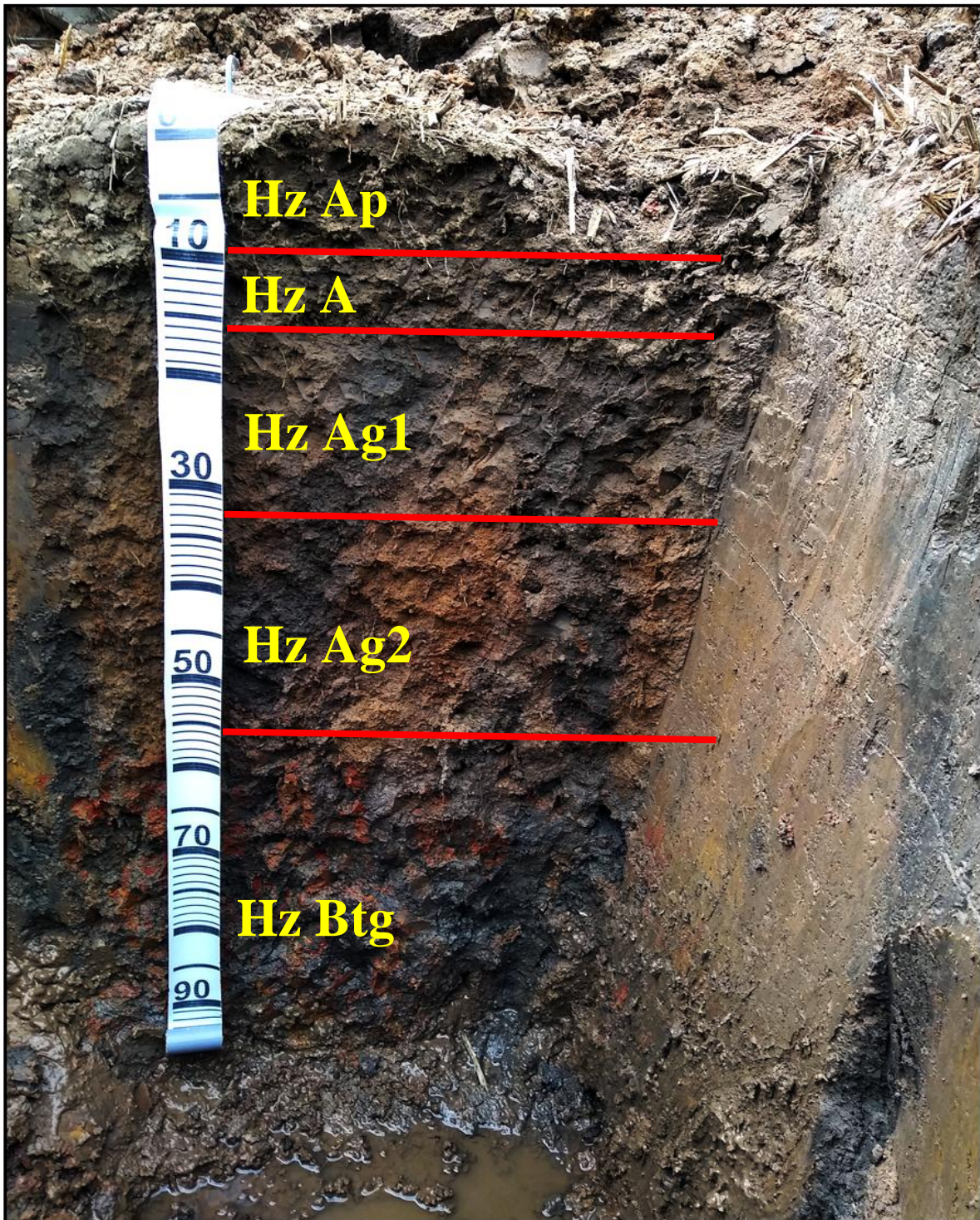
ANEXO A - Descrição físico-química dos horizontes diagnósticos de um Planossolo Háplico Aluminico gleissólico. Santa Maria, RS. 2021.

Horizonte (cm)	Textura (g kg ⁻¹)			pH água 1:1	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg
	Areia	Silte	Argila					
Ap (0-9)	290	490	220	6,0	24,9	0,18	7,6	3,3
A (10-15)	330	430	240	5,9	20,3	0,07	7,1	3,2
Ag1 (16-32)	330	420	250	4,4	13,8	0,04	2,7	1,4
Ag2 (33-55)	270	470	250	4,0	11,8	0,04	1,7	0,7
Btg (56-100+)	150	370	490	4,0	7,4	0,12	4,1	1,9

Horizonte (cm)	Al cmol _c dm ⁻³	H+Al cmol _c dm ⁻³	CTC pH7	CTC efetiva	Saturação (%)		MO (%)
					V (%)	Al (%)	
Ap (0-9)	0,0	3,5	14,7	11,2	76,1	0,0	3,0
A (9-15)	0,0	2,8	13,2	10,4	78,7	0,0	2,1
Ag1 (15-32)	2,5	3,5	7,6	6,6	54,2	37,7	0,7
Ag2 (32-55)	4,7	5,6	8,1	7,2	30,5	65,7	0,9
Btg (55-100+)	7,8	10,2	16,3	13,9	37,5	56,1	0,7

P: fósforo. K: potássio. Ca: cálcio. Mg: magnésio. Al: alumínio. V: saturação de bases. CTC: capacidade de troca de cátions. MO: matéria orgânica.

ANEXO B - Descrição morfológica do perfil solo (Planossolo Háplico Alumínico gleissólico) da área experimental de terras baixas do departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2021.



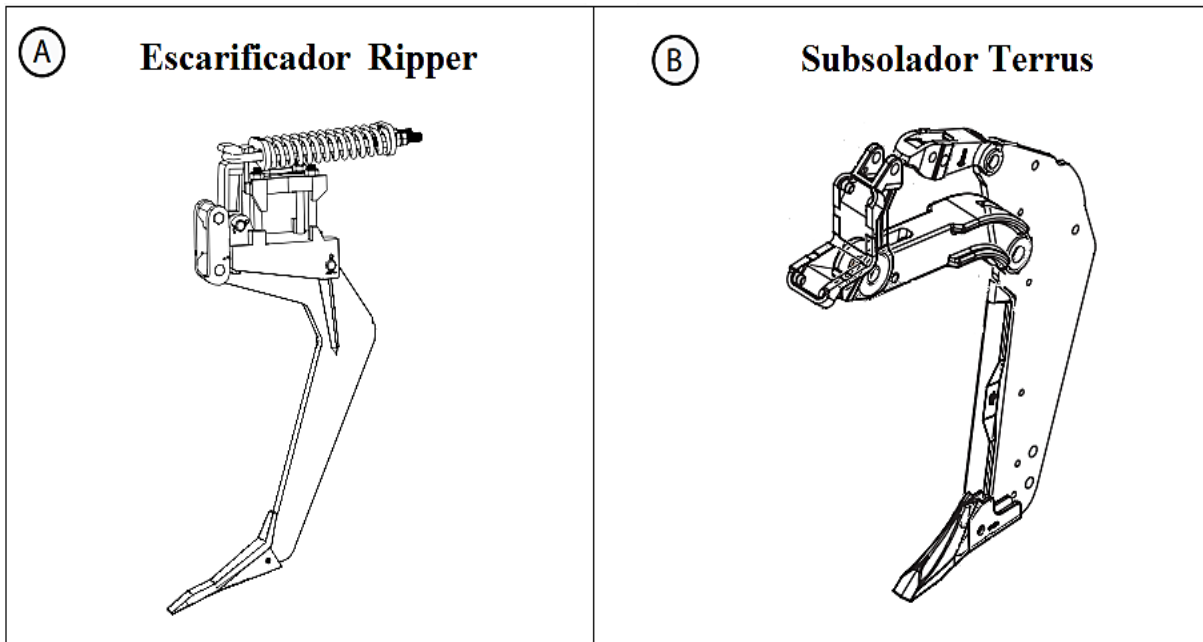
* Descrição morfológica: Prof. Dr. Fabrício de Araújo Pedron (Departamento de solos da Universidade Federal de Santa Maria).

Fonte: Autor.

ANEXO C - Descrição dos equipamentos utilizados para a implantação dos tratamentos referentes aos manejos de solo na entressafra e na semeadura da soja. Santa Maria, RS. 2021.

Trator Massey Ferguson 7719 Dyna-6 (manejos de entressafra)	
Descrição	Especificação
Peso total (kg)	10.725
Potência no motor, cv (kW)	195 (145)
Potência na TDP, cv (kW)	175 (128)
Pressão do pneu dianteiro (kPa)	12
Pressão do pneu traseiro (kPa)	10
Subsolador Terrus DSR (GTS do Brasil)	
Descrição	Especificação
Número de hastes	6
Espaçamento entre hastes (mm)	600
Peso (kg)	3.970
Profundidade de trabalho (mm)	390
Largura da haste (mm)	36
Largura da ponteira (mm)	45
Ângulo de ataque (°)	25
Escarificador Ripper (Industrial São José)	
Descrição	Especificação
Número de hastes	11
Espaçamento entre hastes (mm)	300
Peso (kg)	3.222
Profundidade de trabalho (mm)	350
Largura da haste (mm)	36
Largura da ponteira (mm)	50
Ângulo de ataque (°)	20
Trator Massey Ferguson 6711 (semeadura)	
Descrição	Especificação
Peso total (kg)	6.300
Potência no motor, cv (kW)	115 (85)
Potência na TDP, cv (kW)	98 (72)
Pressão do pneu dianteiro (kPa)	16
Pressão do pneu traseiro (kPa)	14
Semeadora Massey Ferguson 407 Plus	
Descrição	Especificação
Número de linhas	6
Peso (kg)	2.210
Profundidade de atuação (HS desencontrada) (mm)	230
Profundidade de atuação (HS+MAS) (mm)	200
Profundidade de atuação (disco duplo) (mm)	80
Tipo de distribuição de sementes	disco alveolado de 90 furos
Largura da ponteira da HS (mm)	21,3
Largura da HS (mm)	9,8

ANEXO D - Detalhe da haste no formato parabólico do escarificador Ripper (A) e no formato reto inclinado do Subsolador Terrus (B). Santa Maria, RS. 2021.



Fonte: Catálogo de produtos da São José Industrial e da GTS do Brasil (2020).

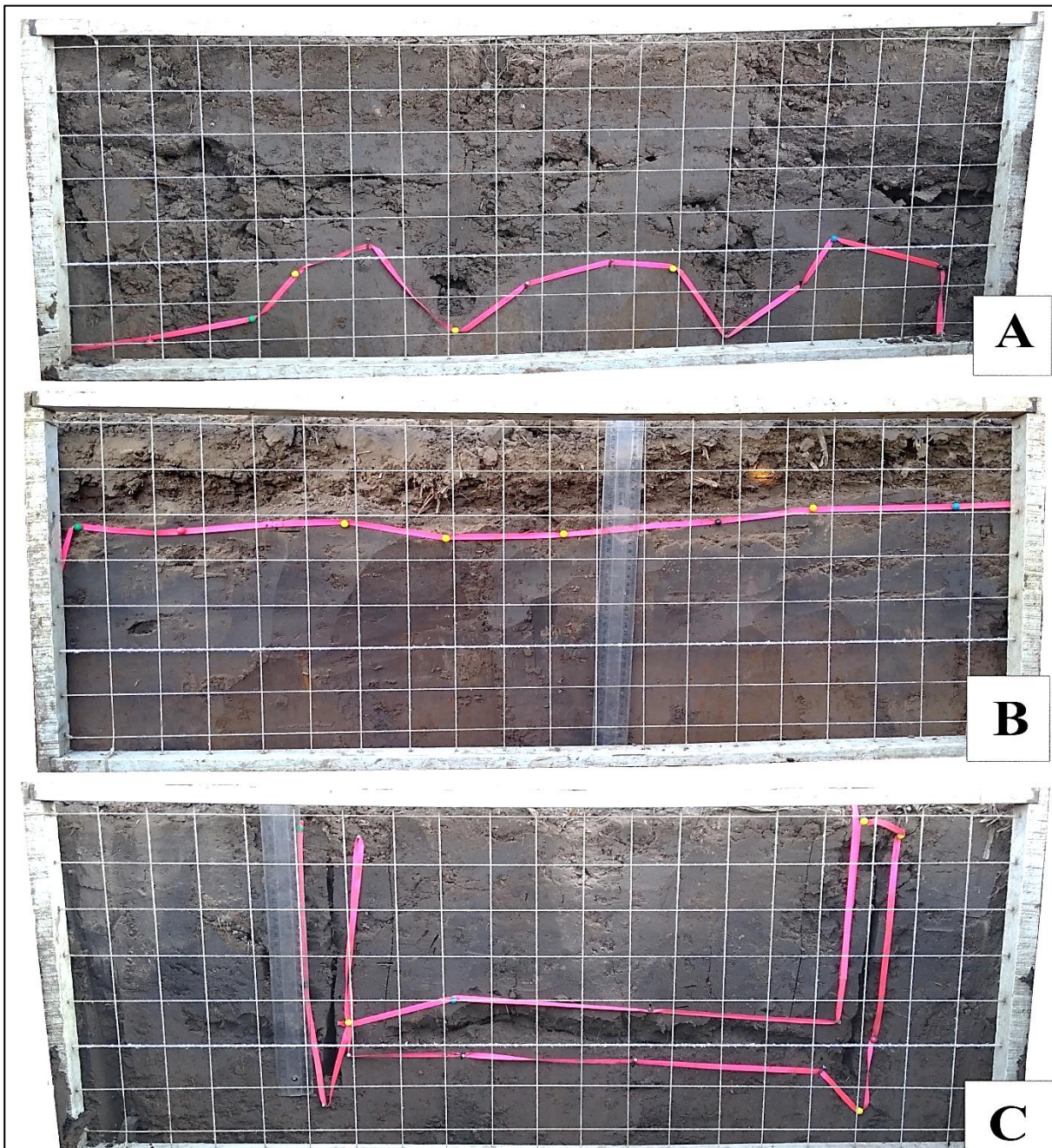
ANEXO E - Instrumentação eletrônica utilizada para a obtenção dos parâmetros referentes ao consumo energético do conjunto mecanizado: força de tração, patinamento e consumo de combustível. Santa Maria, RS. 2021.



* Equipamento e tecnologia pertencente ao Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas (NEMA) da UFSM, coordenado pelo prof. Dr. José Fernando Schlosser.

Fonte: Autor.

ANEXO F - Mobilização do solo em função dos manejos com escarificação (Escarificador Ripper 11 hastes espaçadas a 0,3 m, São José - Figura A), grade aradora (14 discos, Tatu - Figura B) e subsolagem (Subsolador Terrus 6 hastes espaçadas 0,6 m, GTS do Brasil - Figura C) em área de terras baixas compactada. * Quadrículas espaçadas 0,05x0,05 m.



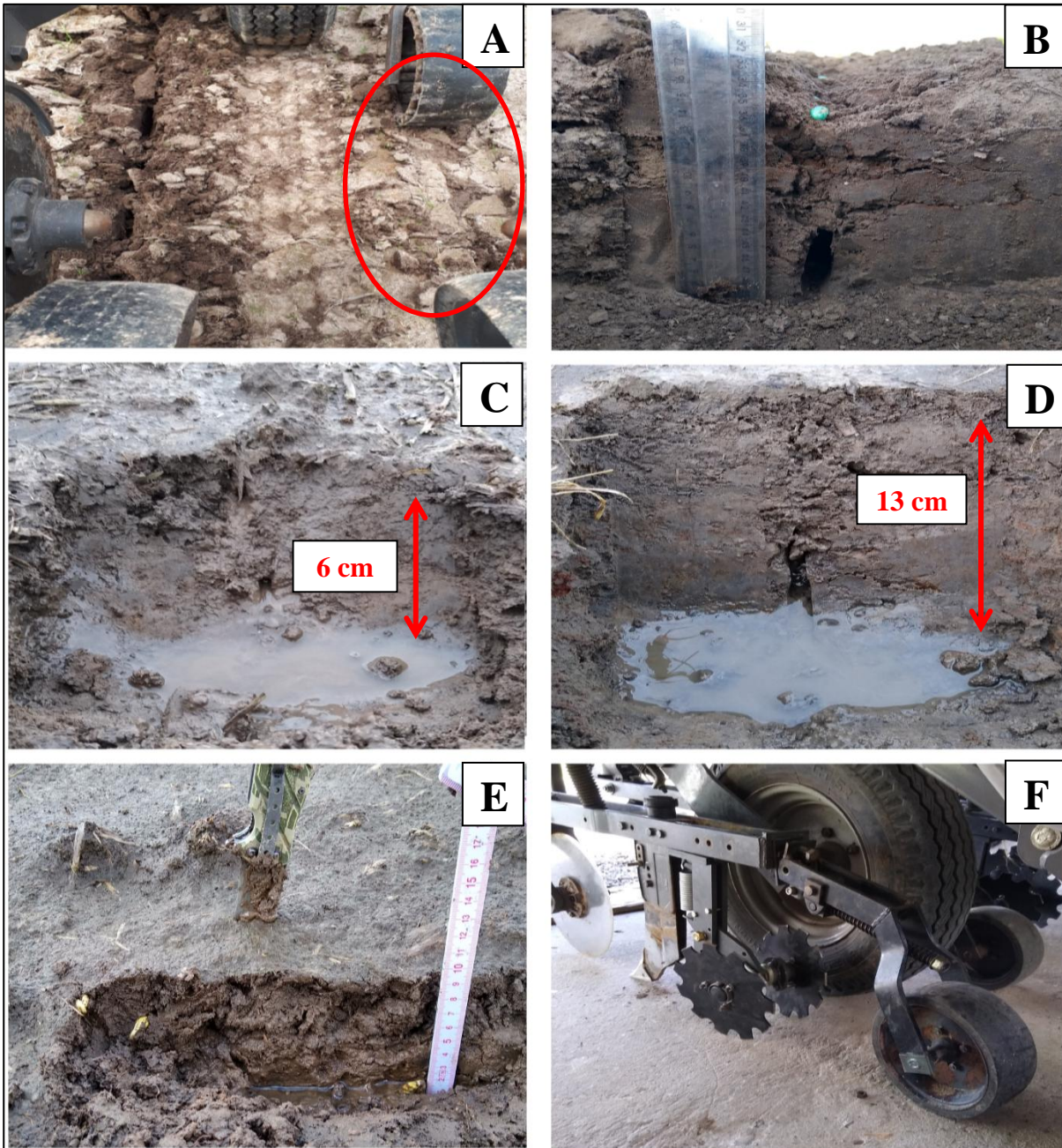
Fonte: Autor.

ANEXO G - Equipamentos referentes aos manejos do solo com escarificação (Figura A), grade aradora (Figura B) e subsolagem (Figura C), bem como a comparação da mobilização da superfície do solo pelos referidos equipamentos (Figura D). Santa Maria, RS. 2021.



Fonte: Autor.

ANEXO H - Detalhe do fechamento do sulco deixado pela haste sulcadora (A) e da deposição de sementes com auxílio do mecanismo de acomodação do solo (MAS) (B); drenagem em subsuperfície 5 h após precipitação de 34 mm no sistema sem preparo do solo + disco duplo (C) e haste sulcadora + MAS (D); detalhe da uniformidade de deposição das sementes no sistema sem preparo do solo + disco duplo (E); detalhe do MAS (F). Santa Maria, RS. 2021.



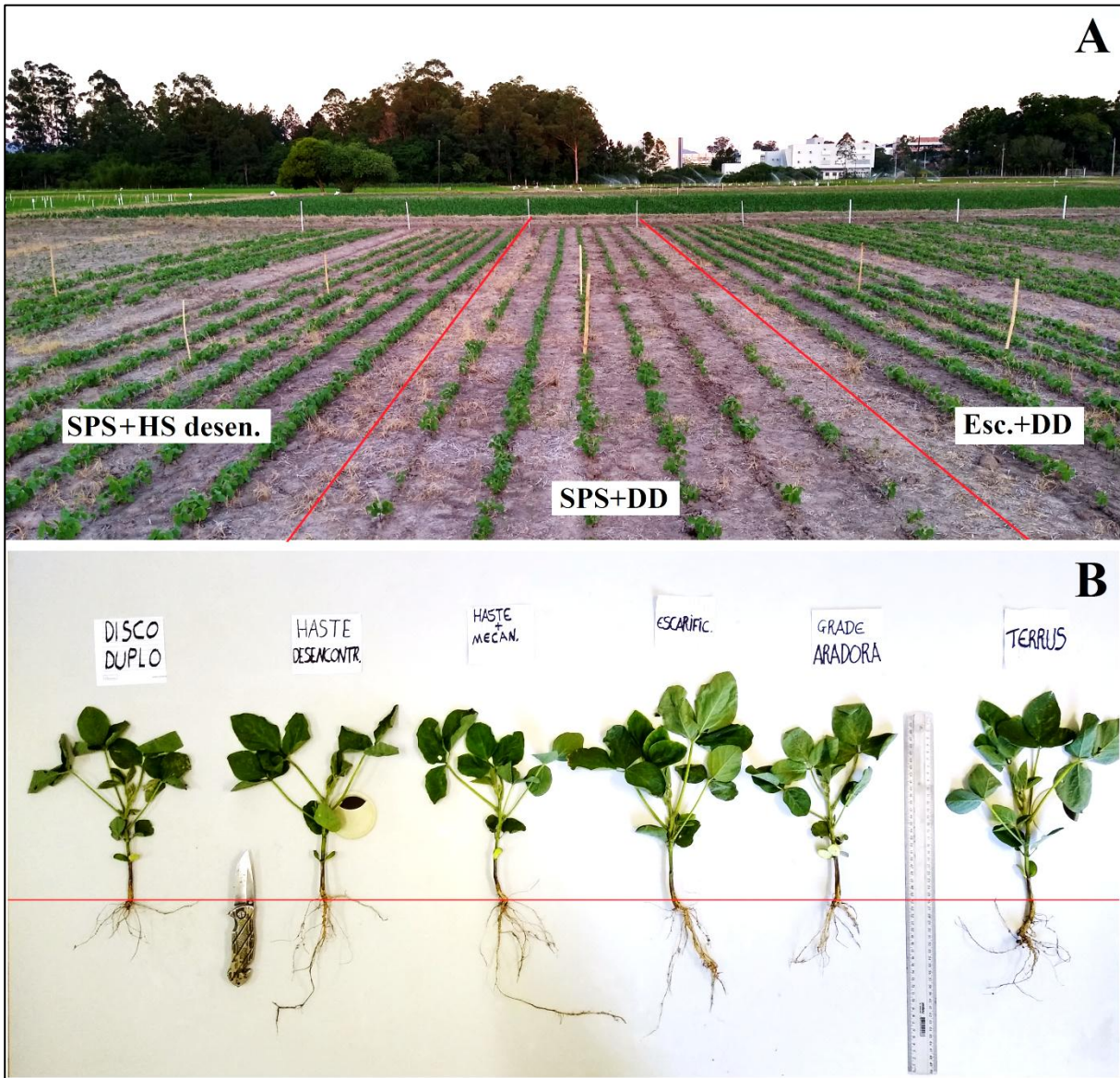
Fonte: Autor.

ANEXO I - Distribuição das sementes de soja em função do manejo do solo e de mecanismos de deposição do fertilizante da semeadora-adubadora em área de terras baixas compactada: Disco duplo a 0,08 m de profundidade (A); Haste sulcadora a 0,20 m + mecanismo de acomodação de solo (B) e Haste sulcadora desencontrada a 0,23 m (C). Santa Maria, RS. 2021.



Fonte: Autor.

ANEXO J - Desenvolvimento inicial das plantas de soja a campo nos sistemas: SPS+HS desencontrada, SPS+DD e escarificado+DD (A) e desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular das plantas 31 dias após a semeadura da soja (B) em área de terras baixas com camada compactada. Santa Maria, RS. 2021. SPS: sem preparo do solo. HS: haste sulcadora. DD: disco duplo.



Fonte: Autor.

ANEXO K - Áreas sem preparo do solo na entressafra de 2019 semeadas com disco duplo na semeadora: sem planta de cobertura (A) e com azevém durante a entressafra de 2020 (B); Áreas como mobilização do solo na entressafra de 2019 associadas ao azevém durante entressafra de 2020: subsolada (C) e escarificada (D). Avaliação realizada em agosto de 2020. Santa Maria, RS. 2021.



Fonte: Autor.

ANEXO L - Escarificação realizada em setembro de 2019: sem azevém (A) e com azevém durante a entressafra de 2020 (B). Avaliação realizada no mês de agosto de 2020, 11 meses após a escarificação. Santa Maria, RS. 2021.



Fonte: Autor.

ANEXO M - Comparativo entre as áreas no momento da escarificação do tratamento Escarificado em 2020+DD: área em pousio na entressafra (A) e área com azevém na entressafra (B). Santa Maria, RS. 2021.



Fonte: Autor.

VITA

Lucas Lopes Coelho é filho de Clovis Cogo Coelho e Elisabeth Lopes Coelho. Nasceu no município de Santiago, Rio Grande do Sul, no dia 21 de julho de 1991. Ingressou no ano de 2010 no curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Santa Maria, recebendo o título de Engenheiro Agrônomo em 2015. No transcorrer do curso de graduação foi estagiário do Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado e Uso Alternativo de Áreas de Várzea (GPAI), sendo bolsista de iniciação científica durante cinco anos (CNPq e FAPERGS). No grupo trabalhou com manejo de soja, milho, arroz irrigado e plantas e cobertura em área de terras baixas. No estágio final de graduação trabalhou na Fundação de Apoio a Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso (Fundação MT), na cidade de Rondonópolis. Na empresa atuou na área de proteção de plantas e melhoramento genético de milho e algodão. No ano de 2015, durante seis meses trabalhou na Nymann's Farm, Minnesota, EUA. Na fazenda realizou atividades relacionadas a semeadura de milho, soja e cevada. Em 2016 iniciou o mestrado acadêmico na UFSM, na área de Fitotecnia, sob orientação do professor Enio Marchesan, recebendo o grau de mestre em agronomia em 2017. No mesmo ano, iniciou como responsável do departamento técnico da Cooperativa Mista dos Agricultores de Toropi (COOMAT), São Pedro do Sul. Atualmente, é Engenheiro Agrônomo da UFSM, atuando como responsável técnico da área experimental do departamento de solos e do Laboratório de Análise de Solos (LAS) da respectiva instituição.