

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Tese de doutorado

**Manejo de solo de várzea para cultivo de soja, milho
e forrageiras hibernais na Fronteira Oeste Gaúcha**

Doutorando: Rafael Ziani Goulart

Orientador: Prof. PhD. José Miguel Reichert

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Ivonir Gubiani

Santa Maria – 2016

Manejo de solo de várzea para cultivo de soja, milho e forrageiras hibernais na Fronteira Oeste Gaúcha

Rafael Ziani Goulart

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Doutor em Ciência do Solo.**

Orientador: José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Goulart, Rafael Ziani

Manejo do solo de várzea para cultivo de soja, milho e forrageiras hibernais na região Fronteira Oeste Gaúcha / Rafael Ziani Goulart.- 2016.

82 p.; 30 cm

Orientador: José Miguel Reichert

Coorientador: Paulo Ivonir Gubiani

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2016

1. propriedades físico-hídricas e mecânicas de solos de várzea 2. Manejo e produção de soja, milho e forrageiras em solos de várzea I. Reichert, José Miguel II. Gubiani, Paulo Ivonir III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**MANEJO DE SOLO DE VÁRZEA PARA CULTIVO DE SOJA, MILHO E
FORRAGEIRAS HIBERNAIS NA FRONTEIRA OESTE GAÚCHA**

elaborada por
Rafael Ziani Goulart

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

José Miguel Reichert, Dr.
(Presidente/Orientador)

Ana Carla dos Santos Gomes, Dra.
(IFFarroupilha)

Ana Rita Costenaro Parizi, Dra.
(IFFarroupilha)

Bento Alvenir Dornelles de Lima, Dra.
(IFFarroupilha)

Miriam Fernanda Rodrigues, Dra.
(UFSM)

Santa Maria, 28 de dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

À minha companheira Lizielle Souza de Oliveira, agradeço de forma especial tudo que fizeste e faz por mim. Além do apoio incondicional, sua paciência, dedicação e incentivo nos fortalecem a cada dia. A você minha querida, meu MUITO OBRIGADO!

Aos meus pais Edi Vernei Souza Goulart e Maria Raquel Ziani Goulart por todo o amor, carinho, paciência, educação, ensinamentos, apoio, oportunidades e por terem sido exemplo de honestidade e dignidade. Também agradeço a minha irmã Fernanda Ziani Goulart pelo amor fraterno, pelo apoio e grande incentivo.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Ao meu orientador, professor José Miguel Reichert pela oportunidade, pela orientação e ensinamentos, além da amizade durante estes anos de convívio.

Ao meu co-orientador e grande amigo Paulo Ivonir Gubiani, agradeço a oportunidade do convívio, a inesgotável paciência e os ensinamentos sempre relevantes para minha vida profissional e pessoal.

À minha colega Miriam Fernanda Rodrigues, pela amizade construída nestes anos de convívio e por todo o aprendizado que pude adquirir junto a ti no Laboratório de Física do Solo. Tua paciência e perseverança são fonte de inspiração.

Aos meus alunos bolsistas e voluntários junto ao IFFarroupilha, Estevan Pydd, Juliane Fonseca, Ingrid Ayres, Giordana Shimitt, Miguel Chaiben Neto, Paula Cardoso, Tiago Shimitt e Vitor Pedroso. Muito obrigado pelo esforço e apoio nas longas jornadas dedicadas a coleta de dados tanto no campo quanto no laboratório.

Ao IFFarroupilha e aos colegas servidores pelo apoio na realização desta formação.

A todos indistintamente, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, de minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

TESE DE DOUTORADO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Universidade Federal de Santa Maria

MANEJO DE SOLO DE VÁRZEA PARA CULTIVO DE SOJA, MILHO E FORRAGEIRAS HIBERNAS NA FRONTEIRA OESTE GAÚCHA

AUTOR: RAFAEL ZIANI GOULART

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Santa Maria, 28 de dezembro de 2016.

Este estudo buscou compreender a capacidade que diferentes sistemas de manejo do solo de várzea possuem para a manutenção de um ambiente físico capaz de diminuir o efeito da hipóxia ao longo do ciclo de culturas de sequeiro, bem como a relação existente entre sistemas de manejo do solo e o desempenho agrônômico das culturas de sequeiro utilizadas na rotação com o arroz irrigado. Para atender ao objetivo, foram cultivadas culturas de sequeiro em área de várzea nos anos agrícolas de 2014/2015 (ANO I) e 2015/2016 (ANO II). No ANO I, a cultura da soja foi semeada em 3 sistemas de manejo (convencional, escarificado e camalhão) em um Gleissolo Melânico. No ANO II, em um Gleissolo Háptico, quatro cultivares de soja e uma variedade de milho foram cultivadas em 4 sistemas de manejo (convencional, escarificado, camalhão e escarificado+camalhão). As quatro cultivares de soja constaram de distintos grupos de maturação (hiper-precoce a semi-tardio). Nesse ano, após o cultivo da soja, foram cultivadas forrageiras hibernais (aveia preta, azevém e consórcio de azevém com aveia-preta). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com 4 repetições. No ANO II o experimento com soja teve as parcelas subdivididas com os diferentes grupos de maturação e após com os diferentes arranjos forrageiros. Para avaliar a modificação físico-hídrica causada pelos diferentes manejos propostos, foram medidos a densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, a condutividade hidráulica de solo saturado, a taxa de infiltração de água no solo, a rugosidade aleatória e o desnível médio do camalhão nos dois anos em três momentos distintos (na semeadura, aos 45 e aos 140 dias após a semeadura: 0 DAS, 45 DAS e 140 DAS, respectivamente). Além disso, fora realizado ensaio de resistência à penetração aos 45 DAS nos ANOS I e II. O desempenho das plantas foi medido pelo teor de clorofila nas folhas, % plantas estabelecidas e rendimento de grãos para as culturas de milho e soja. Também fora medido o índice de área foliar na cultura da soja. Para a avaliação do desempenho das forrageiras hibernais mediu-se a produção de matéria seca da parte aérea. A escarificação isolada ou acompanhada da construção do camalhão proporcionou um ambiente físico com maior drenagem (taxa de infiltração), maior espaço poroso ocupado por ar (macroporosidade) e menor resistência à penetração do que os sistemas de manejo convencional e apenas com camalhão, durante todo o ciclo das culturas estivais. Porém, esses efeitos são menos intensos com o tempo e concentram-se em profundidades menores do que a profundidade de trabalho da haste do escarificador. O formato obtido com a construção do camalhão sofreu acomodação de aproximadamente 41% no desnível crista/sulco durante o período estival. A escarificação mecânica aumentou significativamente a produtividade da soja, do milho e das forrageiras em solos de várzea, seja esta uma prática isolada ou associada à construção de camalhões. A construção de camalhões isolada teve efeito contrastante na produção da soja nos dois anos agrícolas, por não se diferenciar do sistema convencional ou por se assemelhar aos sistemas escarificado e escarificado com camalhão. Não houve relação conclusiva entre ciclo da cultura da soja e sua relação com o rendimento de grãos. Porém, em anos de alta pluviosidade, a escarificação auxilia na melhoria de parâmetros físico-hídricos responsáveis por reduzir o estresse por deficiência de oxigênio em solos de várzea; no entanto, o excesso de chuva reduz os benefícios proporcionados por este manejo. **Palavras-chave:** deficiência por oxigênio, soja, milho, forrageiras, escarificação, camalhão.

ABSTRACT

Doctorate thesis

Post-Graduate Program in Soil Science

Federal University of Santa Maria

MANAGEMENT OF WETLAND SOIL FOR SOYBEAN, CORN AND HIBERNARY FORAGE GROWERS ON THE WEST BORDER GAUCHA

AUTHOR: RAFAEL ZIANI GOULART

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Santa Maria, Dec 28, 2016.

This study sought to understand the capacity of different management systems of the wetland soil for the maintenance of a physical environment capable of reducing the effect of hypoxia during the cycle dryland crops, as well as the relationship between soil management systems and the agronomic performance of the rainfed crops used in rotation with the irrigated rice. To meet the objective, dryland crops were cultivated in wetland area in the agricultural years of 2014/2015 (YEAR I) and 2015/2016 (YEAR II). In YEAR I, the soybean crop was planted in 3 management systems (conventional, chiseling and ridge). In YEAR II, four cultivars of soybean and a variety of maize were cultivated in 4 management systems (conventional, chiseling, ridge and chiseling + ridge). The four soybean cultivars consisted of different maturation groups (hyper-precocious to semi-late). This year, after the cultivation of soybeans, winter forages were cultivated (black oats, ryegrass and consortium ryegrass with black oats). The experimental design was in randomized blocks with 4 replicates. In YEAR II the experiment with soybean had the plots subdivided with the different maturation groups and afterwards with the different forage arrangements. In order to evaluate the hydro-physical properties modification caused by the different proposed treatments, soil density, total porosity, macroporosity, microporosity, saturated soil hydraulic conductivity, soil water infiltration rate, random roughness and the mean slope of the ridge in two years at three different times (at seeding, at 45 and 140 days after seeding: 0 DAS, 45 DAS and 140 DAS, respectively). In addition, a penetration resistance test was carried at 45 DAS in the YEARS I and II. Plant performance was measured by leaf chlorophyll content, established plants and grain yield for corn and soybean crops. The leaf area index in the soybean crop had also been measured. For the evaluation of the performance of the winter forages was measured the dry matter production of the aerial part. Chiseling alone or accompanied by the construction of the ridge provided a physical environment with greater drainage (infiltration rate), greater pore space occupied by air (macroporosity) and less resistance to penetration than conventional management systems and only with ridge. However, these effects are less intense over time and concentrate at depths smaller than the working depth of the scarifier stem. The shape obtained with the construction of the ridge suffered accommodation of approximately 41% in the crest / furrow slope during the summer period. The chiseling increased the productivity of soybeans, maize and forages in wetland soils, whether this is an isolated practice or associated to the construction of ridges. Ridges isolates construction had a contrasting effect on the soybean production in the two agricultural years, because it did not differ from the conventional system or because it resembled the chiseling and chiseling with ridge. There was no conclusive relationship between soybean cycle and its relation with grain yield. The results show that the chiseling helps to improve the hydro-physical properties responsible for reducing stress due to oxygen deficiency in wetland soils. However, the excess rainfall reduces the benefits provided by this management.

Keywords: deficiency by oxygen, soybean, corn, forage, chiseling, ridge.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado no momento da semeadura. ANO I. Alegrete, RS.....	45
Tabela 2. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado 55 dias após a semeadura. ANO I. Alegrete, RS.	46
Tabela 3. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado 140 dias após a semeadura. ANO I. Alegrete, RS.	47
Tabela 4. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado no momento da semeadura. ANO II. Alegrete, RS.....	49
Tabela 5. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado 45 dias após a semeadura. ANO II. Alegrete, RS.	50
Tabela 6. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado 140 dias após a semeadura. ANO II. Alegrete, RS.	53
Tabela 7. Taxa de infiltração de água em Gleissolo Melânico sob diferentes formas de preparo e semeadura. ANO I. Alegrete, RS.	54
Tabela 8. Taxa de infiltração de água em Gleissolo Háplico sob diferentes formas de preparo e semeadura. ANO II. Alegrete, RS.	54
Tabela 9. Rugosidade superficial aleatória em Gleissolo Melânico sob diferentes formas de preparo e semeadura. ANO I. Alegrete, RS.	60
Tabela 10. Rugosidade superficial aleatória em Gleissolo Háplico sob diferentes formas de preparo e semeadura. ANO II. Alegrete, RS.	61
Tabela 11. Desnível médio dos tratamentos com camalhão em diferentes momentos ao longo do ciclo das culturas. ANOS I e II. Alegrete, RS.	61
Tabela 12. Índice de área foliar e população de plantas estabelecidas de soja semeada em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2014/2015. Alegrete, RS.	62
Tabela 13. Índice de área foliar e população de plantas estabelecidas de cultivares de soja semeadas em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2015/2016. Alegrete, RS.	62
Tabela 14 Teor de clorofila na folha de soja em área de várzea submetido a diferentes manejos do solo – Safra 2014/2015 – Cultivar BMX PONTA. Alegrete, RS.	63
Tabela 15. Teor de clorofila na folha de cultivares de soja semeadas em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2015/2016. Alegrete, RS...63	63
Tabela 16. Rendimento de soja em área de várzea submetido a diferentes manejos do solo – Safra 2014/2015 – Cultivar BMX PONTA. Alegrete, RS.	64
Tabela 17. Rendimento de cultivares de soja em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2015/2016. Alegrete, RS.	65
Tabela 18. População de plantas estabelecidas de milho, para uma população idealizada de 60.000 pl ha ⁻¹ em várzea sob diferentes manejos solo. Alegrete, RS. 66	66
Tabela 19. Teor de clorofila na folha da cultura do Milho cultivado em solo de Várzea no município de Alegrete RS.....	66

Tabela 20. Rendimento de grãos em kg ha⁻¹ para a cultura do milho na safra 2015/2016 em solo de várzea submetido a diferentes manejos. Alegrete, RS.67

Tabela 21. Produção de matéria seca de forrageiras hibernais em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2015/2016. Alegrete, RS.70

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Colheita e transporte de grãos de arroz.	28
Figura 2: Semeadura e preparo do solo convencional.	29
Figura 3: Semeadura e preparo do solo escarificado.	30
Figura 4: Semeadura e preparo do solo em camalhões.	31
Figura 5: Semeadura e preparo do solo escarificado + camalhões.	31
Figura 6. Escarificação realizada no ANO I. Conjunto Trator Massey Ferguson 7150 + Escarificador 9 hastes.	32
Figura 7. Semeadora KF 8/5 Camalhoneira (C) com detalhe da aiveca utilizada para construção dos camalhões (A) e (B) e área com camalhão na emergência das plântulas de soja (ANO I) (D).	33
Figura 8. Parcelas com tratamento CONV (A), ESC (B), CAM (C) em 03/12/2014 após uma chuva de 68 mm.	34
Figura 9. Vista externa da área experimental durante período de alagamento (A); visão da parcela com a cultivar que se conservou após o período de alagamento (B); detalhe de folíolo de soja coberto com sedimento de solo (C); cultivar sobrevivente com trifólios novos (D)	35
Figura 10. Ensaio de infiltração realizado no dia da semeadura nos ANO I (A) e ANO II (B) e detalhe do infiltrômetro de anéis concêntricos sobre tratamento ESC (C) CAM (D).	38
Figura 11. Perfilômetro de hastes para avaliação da Rugosidade superficial aleatória nos tratamentos CONV e CAM.	39
Figura 12. Vista aérea dos blocos com forrageiras e detalhe dos tratamentos utilizados.	41
Figura 13. Precipitação pluvial mensal durante o ANO I.	42
Figura 14. Precipitação pluvial mensal durante o ANO II.	43
Figura 15. Resistência do solo à penetração (em kPa) medida 45 dias após as operações de preparo e semadura em Gleissolo Melânico. ANO I. Alegrete, RS.	56
Figura 16. Resistência do solo à penetração (em kPa) medida 55 dias após as operações de preparo e semeadura em Gleissolo Háplico. ANO II. Alegrete, RS.	58
Figura 17. Tratamento CAM com subparcelas da esquerda para direita de Aveia, Consórcio e Azevém.	69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. HIPÓTESES	14
3. OBJETIVO GERAL	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 Cultivos de sequeiro em solos de várzea	15
4.2 O efeito do alagamento sobre as culturas de sequeiro	19
4.3 Uso de cultivares tolerantes.....	21
4.4 Manejo do solo de várzea	23
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
5.1 Áreas de estudo e estratégia de ação dos tratamentos.....	27
5.2 Propriedades físico-hídricas do solo.....	36
5.3 Análises de planta	39
5.4 Análise estatística	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.1 Condições Climáticas.....	42
6.2 Densidade, porosidade e condutividade hidráulica do solo	43
6.3 Taxa de infiltração de água no solo.....	53
6.4 Resistência à penetração mecânica do solo	55
6.5 Rugosidade superficial aleatória e desnível médio do camalhão.....	59
6.6 Parâmetros das culturas.....	61
6.6.1 Soja.....	61
6.6.2 Milho	65
6.6.3 Forrageiras.....	68
7. CONCLUSÕES	71
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1. INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul, principalmente na região fisiográfica da Fronteira Oeste, a cultura do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) possui grande importância econômica e social. Dos 5,4 milhões de hectares de várzea existente no estado e aptos para o cultivo de arroz, apenas aproximadamente 1,1 milhões de hectares são cultivados com arroz irrigado, anualmente (PINTO et al., 2004; CONAB, 2016). Essa reduzida área cultivada com arroz, diante da sua área potencial total, deve-se, principalmente, ao reduzido volume de água disponível para irrigação por inundação apesar de existirem restritas alternativas de rotação e sucessão de culturas para estas áreas.

O sistema de produção tradicional estabelecido nestes solos (arroz irrigado x pecuária de corte) tem enfrentado problemas de baixa rentabilidade, devido à alta infestação de plantas daninhas (arroz vermelho) e à necessidade de longos períodos de pousio após o cultivo.

Entre as alternativas capazes de elevar o potencial produtivo da cultura do arroz e a produtividade global das áreas, destaca-se a rotação do arroz com as culturas da soja e do milho, no período estival, e com forrageiras, no período hibernar. Os maiores obstáculos para a adaptação destas culturas a este ambiente são a grande complexidade na obtenção de cultivares suficientemente tolerantes às condições de excesso hídrico recorrentes e a dificuldade de drenagem das áreas de várzea. Por outro lado, dentre as principais vantagens destes cultivos, estão a redução na infestação de plantas daninhas, principalmente o arroz vermelho, o controle de doenças e a ciclagem de nutrientes. Além disso, as *commodities* soja e milho possuem grande liquidez e grande estabilidade de preço no mercado atual e as forrageiras hibernais auxiliam em um período crítico à produção de forragem em campo nativo no estado do RS.

Os diferentes genótipos de soja apresentam variabilidade quanto à sua adaptação ao excesso hídrico, porém não existem cultivares totalmente tolerantes. Por isso, há uma incessante busca pela identificação de cultivares mais adaptadas à condição de períodos de alagamento temporário, dentre as cultivares disponíveis no mercado. O uso de genótipos pouco adaptados pode proporcionar alterações fisiológicas e morfológicas, problemas de nodulação e morte de plantas quando ocorrerem períodos de hipóxia (THOMAS et al., 2005). Porém, mesmo que sejam utilizadas cultivares com certo grau de tolerância, cultivares mais precoces (grupos de

maturação mais baixos) podem responder de maneira diferenciada a distintos manejos do solo devido a sua menor capacidade de recuperar-se de estresses sofridos ao longo do ciclo, quando comparadas a ciclos médios ou semi-tardios, tradicionalmente indicados para áreas de várzea devido à sua maior estabilidade de produção (REUNIÃO..., 2014).

Além do uso de cultivares mais adaptadas à condição de excesso hídrico e encharcamento do solo, deve-se considerar, como alternativa ao desenvolvimento de cultivos de sequeiro nestas áreas, manejos do solo que vislumbrem um maior crescimento radicular, seja pelo rebaixamento da camada de impedimento, por meio de escarificação mecânica, ou pela elevação do sistema radicular, por meio da semeadura em camalhão construído.

Estudos que relacionem diferentes manejos sobre a deficiência de oxigênio no solo em áreas de várzea com o desempenho agronômico de soja, milho e forrageiras são incipientes. Assim, estudos de sistemas de manejo do solo que favoreceram a formação e manutenção de um ambiente físico adequado ao crescimento radicular e que reduzam a hipóxia, ao longo do ciclo de culturas de sequeiro em ambientes mal drenados, são necessários a fim de viabilizar o cultivo nestas áreas. Além disso, a possibilidade de interação entre cultivares de soja tolerantes à hipóxia e sistemas de manejo do solo podem favorecer o estabelecimento desta cultura e o aumento da produtividade e da produção em áreas de várzea.

2. Hipóteses

A partir das informações acima, apresentam-se as seguintes hipóteses:

(1) o cultivo em camalhões e/ou escarificado proporciona um ambiente físico com maior drenagem, maior espaço poroso ocupado por ar e menor resistência à penetração de raízes durante o ciclo da cultura. Assim, possibilita um ambiente mais favorável para o desenvolvimento da mesma. Por outro lado, o cultivo convencional apresenta menor drenagem e maior resistência à penetração de raízes e, por consequência, proporciona um ambiente menos favorável para o desenvolvimento das culturas de sequeiro;

(2) o manejo do solo para a redução da hipóxia é mais necessário quanto menor for a duração do ciclo da soja, pois cultivares de ciclo mais curto possuem menor tempo para compensar os estresses sofridos por eventuais condições de hipóxia. Assim, são mais dependentes de um ambiente físico adequado para seu crescimento quando comparadas a cultivares de ciclo mais longo.

3. Objetivo geral

Compreender o efeito de diferentes sistemas de manejo do solo de várzea na manutenção, ao longo do ciclo das culturas de sequeiro, de um ambiente físico que diminua o efeito da hipóxia em ambientes de má drenagem e a relação existente entre sistemas de manejo do solo com o desempenho agronômico das culturas de sequeiro utilizadas na rotação com o arroz.

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Cultivos de sequeiro em solos de várzea

No Brasil, existem aproximadamente 28 milhões de hectares de solos sujeitos ao alagamento (solos aluviais e hidromórficos) (PINTO et al., 2004). A maior parte dessas áreas encontra-se na região dos Cerrados e uma parcela menor (6,8 milhões de ha⁻¹), na região Sul do Brasil. No Rio Grande do Sul, são cultivados anualmente aproximadamente 1,1 milhões de hectares de arroz irrigado, dentre os 5,4 milhões de hectares de várzea (PINTO et al., 2004), devido, principalmente, à limitação hídrica e à falta de alternativas de rotação e sucessão de culturas. Além disso, o sistema de produção tradicional estabelecido nestes solos (arroz irrigado x pecuária de corte) tem enfrentado problemas de baixa rentabilidade, devido à alta infestação de plantas daninhas (arroz vermelho) e à necessidade de longos períodos de pousio (PINTO et al., 2004).

As áreas de várzeas ocupam aproximadamente 20% das áreas agrícolas do estado do Rio Grande do Sul e constituem uma fronteira agrícola de aumento de produção de cereais, leguminosas e carne. Nestas áreas, o sucessivo cultivo de arroz irrigado por inundação favoreceu seriamente a infestação com arroz daninho (vermelho) e a rotação de culturas é uma opção viável para esse sistema.

Muitas vezes, apenas a utilização de insumos modernos como a tecnologia *clearfield*, que consiste no uso de cultivares de arroz portadoras de genes que conferem resistência aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas, não permite que a exploração agrícola se viabilize, no caso da monocultura do arroz irrigado (GASTAL et al., 2004). Nestas áreas, normalmente se faz a rotação com pecuária, pois há certa restrição com a utilização de culturas como o milho e a soja. Porém, com a alta ocorrência de plantas daninhas, principalmente do arroz vermelho, estas culturas aparecem como alternativas interessantes para diminuir esta infestação, utilizando híbridos de milho e cultivares de soja com tecnologia “RR” (resistente a herbicidas a base de glifosato) (SILVA & SCHOENFELD, 2013).

O sistema de rotação de culturas consiste na alternância de diferentes espécies vegetais ao longo de um período no mesmo local e na mesma época de cultivo. A escolha das espécies pode ter propósito comercial, vislumbrando maior lucro, ou ambiental, buscando a recuperação do solo por exemplo. Entre as vantagens da

adoção desse sistema pode-se citar a reciclagem de nutrientes (REGO, 1994), a menor incidência de plantas daninhas (SILVA et al., 2006), melhorar a estrutura do solo (NETO et al., 2006) e estabilização do rendimento de grãos (SANTOS et al., 2000).

Porém, o uso de espécies de sequeiro em solos de várzea ainda sofre grande resistência por parte dos agricultores pois os problemas relacionados à baixa condutividade hidráulica do solo são frequentes em períodos de precipitação pluvial elevada, não somente em solos de várzea, mas também em regiões de solo com baixa capacidade de drenagem. Nessas condições, o desempenho das culturas de sequeiro é afetado, pois o alagamento modifica a atmosfera do solo, o que promove deficiência de O₂, acúmulo de CO₂, metano, etileno, gás sulfídrico (H₂S), além de reduzir a respiração aeróbica (PIRES et al., 2002). Em plantas sensíveis, tais condições alteram seu metabolismo e ocasionam redução da produtividade da cultura (DREW, 1997; JACKSON & COLMER, 2005; SERRES & VOESENEK, 2008).

A extensão de danos ocasionados pelo alagamento do solo depende de vários fatores, como a duração do período de inundação, o estágio de desenvolvimento da planta em que ele ocorre, a espécie, as condições ambientais e de solo e também a variedade ou cultivar utilizado (TAIZ & ZEIGER, 2009).

Assim, o sucesso de um cultivo sob condições de alagamento requer estudos prévios que vão desde espécies alternativas até a avaliação de cultivares que possuam capacidades diferenciadas de tolerância ao alagamento, buscando a obtenção de maiores produtividades nesta condição.

A grande diversidade genética das cultivares de soja pode resultar em respostas diferentes das plantas à inundação, incluindo alterações na arquitetura, no metabolismo, e no acúmulo de biomassa (SERRES & VOESENEK, 2008). A avaliação da diversidade das cultivares tolerantes às condições de alagamento expõe a plasticidade no metabolismo e no desenvolvimento e aclimação dos genótipos. Dessa forma, permite observar as distintas estratégias de adaptação a essas condições do ambiente, o que possibilita detectar traços de tolerância (SERRES & VOESENEK, 2008) que poderão ser utilizados na identificação de cultivares mais tolerantes. Por isso deve ser incessante a busca por cultivares mais adaptadas a essa condição.

A soja (*Glycine max*), em volume, é a principal cultura utilizada para a produção de grãos no Brasil. Na safra de 2015/2016, foram cultivados, aproximadamente, 34

milhões de hectares da cultura, que produziram 103,5 milhões de toneladas do grão (CONAB, 2016). No estado do Rio Grande do Sul, foram semeados 5,45 milhões de hectares de soja e destes, 270 mil hectares foram cultivados em áreas de várzea em rotação com o arroz irrigado com produtividade média de 1850 kg ha⁻¹(IRGA, 2016 – Informação pessoal).

A cultura da soja, inicialmente auxiliada pelo trigo, foi a grande responsável pelo surgimento da agricultura comercial no Brasil. A soja também foi responsável pela aceleração da utilização da mecanização das lavouras brasileiras, modernização do sistema de transportes, expansão da fronteira agrícola, profissionalização e incremento do comércio internacional, modificação e enriquecimento da dieta alimentar dos brasileiros, aceleração da urbanização do País, interiorização da população brasileira (concentrada no Sul, Sudeste e litoral do Norte e Nordeste), tecnificação de outras culturas (destacadamente a do milho), bem como impulsionou e interiorizou a agroindústria nacional, patrocinando a expansão da avicultura e da suinocultura brasileiras (EMBRAPA, 2004).

A soja, atualmente, é considerada por técnicos e produtores rurais como a melhor alternativa para elevar o potencial produtivo das áreas de várzea como um todo. Contudo, as principais limitações para a adaptação da soja a este ambiente são a dificuldade de drenagem e a grande dificuldade na obtenção de cultivares realmente tolerantes às condições de excesso hídrico. A dificuldade de drenagem é oriunda principalmente da topografia plana a levemente ondulada que leva a uma condição de drenagem limitante. Estas características dos solos utilizados para a produção de arroz, muitas vezes dificultam o estabelecimento da lavoura, assim como a obtenção de altos rendimentos que justifiquem financeiramente o cultivo de culturas de sequeiro nestas áreas. O uso de cultivares com características como maior tolerância ao excesso hídrico associado a alto potencial produtivo é um grande desafio para os programas de melhoramento genético da cultura da soja (BANDINELLI et al., 2015).

Juntamente com a soja, a cultura do milho possui grande potencial para ser utilizada em rotação com o arroz irrigado. Entre as suas qualidades estão a fácil comercialização, a adaptabilidade ao sistema, bem como a possibilidade de agregar valor na propriedade, já que é insumo básico na produção de carne e leite, seja na forma de silagem ou grãos. Monitoramentos de safra realizados pela Embrapa, desde 1986, indicam que a produtividade de arroz, quando em rotação com o milho, é em torno de 25% maior. As vantagens mais citadas são: aumento da produtividade,

diminuição da infestação de arroz-vermelho e preto, facilidade de adoção do plantio direto para ambas culturas e redução de custos com preparo do solo (GASTAL et al., 2004). O cultivo de milho em área de arroz foi incrementado a partir de 1997, sendo cultivados 50.000 hectares no ano agrícola 1999/2000 (PARFITT, 2000). As pesquisas para o cultivo do milho em áreas de arroz vêm sendo realizadas há alguns anos, porém de forma descontínua (SILVA & SCHOENFELD, 2013), principalmente devido à volatilidade de preços do cereal, o que torna seu cultivo mais ou menos atrativo.

As principais dificuldades de adoção da cultura do milho, detectadas nas condições de lavoura, são: a falta de domínio, pelos produtores, do sistema de cultivo do milho em áreas tradicionais de arroz irrigado, consequência da sensibilidade desta cultura aos estresses hídricos, principalmente por excesso, mas também por escassez de umidade; a instalação das lavouras fora da época, devido à prioridade de mão-de-obra e máquinas para a lavoura de arroz na propriedade; as falhas nos controles de plantas daninhas, falhas no manejo do controle de pragas (principalmente lagarta do cartucho); e falta de estrutura da propriedade, principalmente para a colheita na época apropriada (GASTAL et al., 2004).

Com propósito comercial ou ambiental na rotação de culturas, o uso de forrageiras hibernais em áreas foi e segue sendo o mais difundido na rotação com arroz irrigado. A recomendação de forrageiras, como culturas alternativas para terras baixas, remonta às próprias origens do uso dessas áreas, a própria pecuária de corte. (REIS & SAIBRO, 2004). Estes autores recordam que ao tratar o recurso forrageiro como insumo à pecuária de corte, esta foi a primeira atividade econômica nas várzeas gaúchas (REIS & SAIBRO, 2004). No Sul do estado, esta atividade tomou impulso a partir de 1780, com o estabelecimento da primeira charqueada. Na mesma região, o cultivo do arroz foi introduzido somente ao redor de 1900. Até os anos 2000, o binômio arroz x pecuária de corte foi considerado o esteio do desenvolvimento da metade-sul do RS.

No RS, os ganhos de peso vivo de novilhos em pastagens cultivadas em solos de várzea vão de 180 a 695 kg/ha/ano, dependendo do ano, da adubação e da categoria animal utilizada (MARCHEZAN et al., 2000 e 2002; SAIBRO & SILVA, 1999). Dessa forma, o potencial de produção animal nestas áreas é bastante grande, uma vez que os ganhos tradicionalmente obtidos estão ao redor de 70 kg/ha/ano (NABINGER et al., 2009).

4.2. O efeito do alagamento sobre as culturas de sequeiro

O volume de água, que infiltra no solo via chuva ou irrigação, quando superior à capacidade de infiltração e/ou armazenamento do solo por um longo período de tempo, proporciona a saturação do mesmo. Quando isso acontece, o excesso de água é escoado sobre a superfície até alcançar um canal que a retire da zona de exploração agrícola. Se a quantidade escoada não é suficiente, sobrevém o alagamento do solo, que causa uma série de limitações ao metabolismo das plantas devido ao excesso de umidade, exceto para plantas adaptadas como o arroz irrigado.

Locais submetidos aos efeitos do excesso de água, seja pela baixa condutividade hidráulica ou pelo excesso de chuva, permitem que um grupo de vegetação específica se desenvolva. As inundações impõem uma pressão de seleção sobre as plantas, principalmente porque o excesso de água no seu entorno pode privá-las de necessidades básicas, notadamente de oxigênio, dióxido de carbono e luz para a fotossíntese.

Quando o solo se torna encharcado, a transferência de O_2 do ar para o solo é alterada, pois os poros do solo (macroporos) que geralmente estão ocupados por ar ficam preenchidos de água. Sem a reposição do ar, o O_2 dissolvido remanescente no solo é rapidamente consumido por microorganismos e/ou plantas, fazendo com que o solo não seja mais capaz de fornecer O_2 (DREW et al., 1997).

O alagamento do solo é uma das principais influências abióticas na distribuição das espécies (JACKSON et al., 2009). A falta de O_2 causa um endurecimento das paredes das raízes e diminui a permeabilidade (KOKOBUN, 2013). Dessa forma, as culturas, muitas vezes, desenvolvem mecanismos de adaptação que lhe conferem tolerância aos efeitos da deficiência de oxigênio no sistema radicular, tais como o desenvolvimento de raízes adventícias e a formação de tecido aerenquimático (KOKOBUN, 2013).

Porém, um período longo de alagamento do solo pode ser danoso na fase de germinação da cultura. A germinação é um processo composto de muitos eventos metabólicos (mobilização de reservas) (BEWLEY, 1997) e o encharcamento do solo durante este processo pode prejudicar esses eventos, conduzindo a uma fraca germinação. Em condições de umidade do solo favorável, sementes absorvem água lentamente, de modo que os processos fisiológicos normais (transformação do

embrião em uma plântula estabelecida) necessários para a germinação prossigam normalmente (NAKAYAMA et al., 2005). Sob condições de alagamento, no entanto, as sementes absorvem água rapidamente, de modo que os tecidos são destruídos devido à expansão abrupta das células, o que provoca a falha da germinação normal (TIAN et al., 2005).

Quando há muita umidade e a concentração de oxigênio no solo é baixa, há uma inibição da atividade respiratória das sementes em germinação e, assim, reduz-se a velocidade de germinação (KOKUBUN, 2013). Durante a germinação prolongada, as sementes ficam mais suscetíveis a doenças transmitidas pelo solo, o que reduz ainda mais a porcentagem de germinação.

Os danos causados pelo alagamento são mais graves em sementes com menor teor de umidade (NAKAYAMA et al., 2005). Quando a umidade das sementes é ajustada para níveis maiores (acima de 13%) a germinação é bastante superior, mesmo em condições de alagamento superior a 48 horas (NAKAYAMA et al., 2004).

Após a germinação, o alagamento do solo prejudica o funcionamento das plantas de outras diversas formas: deprime a respiração aeróbia, resulta na produção de substâncias tóxicas, e excessivamente aumenta ou reduz a disponibilidade de nutrientes (KOKOBUN, 2013). Desses efeitos adversos, a inibição da respiração aeróbica induzida por hipóxia é mais prejudicial para o crescimento e a produtividade das plantas, pois prejudica a absorção de água e nutrientes (VOESENEK et al., 2006; SAIRAM et al., 2008).

Na soja, o excesso de água do solo reduz substancialmente a taxa de respiração das raízes, o que resulta em crescimento de raiz e nodulação reduzidos. O nitrogênio (N) absorvido pela soja é limitado pelo excesso de água no solo, porque a planta é largamente dependente da fixação simbiótica de N_2 , o que requer uma grande quantidade de oxigênio. Assim, a exigência de oxigênio da raiz de soja é tão elevada que a hipóxia induzida pelo alagamento é prejudicial para a fixação de N_2 , o que causa deficiência deste nutriente na planta. Como a capacidade de absorção de água e de N diminuem em condições alagadas, o teor de N foliar diminui, resultando em uma menor taxa fotossintética e, por consequência, a produção de matéria seca (OOSTESHUIS et al., 1990). Além disso, o acúmulo de dióxido de carbono (CO_2) produzido pela respiração e fermentação (CRAWFORD & BRAENDLE, 1996) também auxilia na inibição do crescimento das raízes da soja (ARAKI, 2006).

Como estratégia de adaptação ao encharcamento, plantas higrófitas podem formar aerênquimas (tecidos com células cheias de ar, que se interligam longitudinalmente ao longo das partes da planta). Estes tecidos fornecem um caminho de baixa resistência para o transporte de gás a partir da parte superior do vegetal até as raízes e, assim, ajudam a manter a atividade radicular sob condições de hipóxia (MAGNESCHI & PERATA, 2009). A soja, quando exposta a inundações, também forma aerênquima secundário em caules, raízes principais, raízes adventícias e nódulos para fornecer oxigênio para o sistema radicular e nódulos para manter a sua função (SHIMAMURA et al., 2010). Variedades de soja selvagem desenvolvem aerênquimas em uma maior quantidade do que as variedades cultivadas, o que, provavelmente, proporciona uma maior tolerância ao encharcamento (SHIMAMURA et al, 2010).

A inundação completa é prejudicial para a maioria das plantas terrestres porque impede crescimento e pode resultar em morte prematura (SERRES & VOESENEK, 2008). No entanto, algumas espécies de plantas, têm uma capacidade notável para suportar essas condições, e certas espécies podem até crescer vigorosamente, como é o caso do arroz irrigado. Desta maneira, a utilização de genes, que controlam o metabolismo sob deficiência de O₂, constitui uma estratégia para impulsionar o ajuste dos mecanismos de tolerância (SERRES & VOESENEK, 2008). Porém, é importante ressaltar que a modificação genética para a incorporação de genes oriundos de plantas selvagens tolerantes ao alagamento em cultivos de sequeiro é um processo demorado e oneroso, o que dificilmente atrairia investimentos da iniciativa privada, devido a pequena área (proporcionalmente) a ser utilizada.

4.3. Uso de cultivares tolerantes

O excesso de água no ambiente pode estar relacionado com a sazonalidade da altura do lençol freático, as inundações esporádicas, ou falta de drenagem, ou quando ocorre excesso de chuva. Soluções para as limitações ocasionadas pelo estresse por inundação são o objetivo de vários estudos que buscam informações para aumentar a produtividade dos cultivos nestes ambientes sem ocasionar a degradação dos recursos naturais (SILVA & SCHOENFELD, 2013; LANGE et al., 2013; MULLER, 2015). Porém, estes estudos concentram-se majoritariamente na cultura da soja.

A adoção do cultivo de soja em rotação com o arroz irrigado pela maioria dos orizicultores da região Sul do Brasil, no entanto, só será plena quando for oferecido um pacote tecnológico, que contemple cultivares de soja e manejo adaptados às condições de cultivo em solos arroseiros, que permitam obter rendimentos de grãos de forma economicamente viável e de forma estável (LANGE et al., 2013).

Possivelmente, graus de tolerância ao alagamento surgem conjuntamente com as características constitutivas, resultado da plasticidade fenotípica, e a adaptação revelada por meio da interação planta-ambiente (JACKSON et al., 2009). Trabalhando com diferentes cultivares de soja, colocadas sob alagamento em diferentes estádios fenológicos por diferentes períodos de tempo, Scott et al. (1989) observaram a ocorrência de resposta diferenciada entre cultivares para altura do dossel das plantas, em função do estágio fenológico e do período de inundação.

O entendimento dos mecanismos morfológicos de tolerância à inundação é importante para o desenvolvimento de genótipos tolerantes a essas condições. Os níveis extremos de umidade do solo nas terras baixas do Estado do Rio Grande do Sul obrigam o uso de cultivares com características especiais de adaptação e desta forma os estudos para identificação de cultivares mais tolerantes à condição de alagamento são necessários e possibilitam a indicação destes genótipos para cultivo ou uso no melhoramento.

O principal parâmetro para identificação destes genótipos é o potencial produtivo das plantas sob esta condição. Trabalhando com diferentes cultivares em diversos anos sob solo alagado, Rhine et al. (2010) observaram que a produção é afetada negativamente pelo aumento no período de alagamento, e que as cultivares respondem distintamente nos diferentes anos. Se o estresse por alagamento ocorre no período vegetativo, o crescimento das plantas é mais afetado, enquanto que, se esse acontece no estágio reprodutivo, afeta mais a produtividade de grãos (SCOTT et al., 1989).

Dentro do período reprodutivo, o efeito sobre a produtividade é diferente dependendo do subperíodo em que ocorre o alagamento (STANLEY et al., 1980), sendo a cultura da soja mais sensível no início do enchimento de grãos. Já o excesso de água no período de crescimento da cultura reduz a altura, a área foliar e a massa seca das plantas (MOMEN et al., 1979).

O cultivo da soja em solo com excesso hídrico afeta os componentes do rendimento, com variação no número de legumes, número de grãos por legume e

produção de grãos em plantas de soja submetidas a excesso hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura (SCHOFFEL et al., 2001). Além da redução na produção de grãos e no acúmulo de massa seca das plantas, o número de legumes e de grãos diminui se a soja passa por períodos prolongados de inundação (CHO & YAMAKAWA, 2006). Assim, cultivares de ciclo médio a tardio tendem a tolerar mais os estresses promovidos pelo encharcamento do solo. Por isso, têm sido mais indicadas para áreas de várzea devido a sua maior estabilidade de produção (REUNIÃO..., 2014; THEISEN et al., 2009).

Porém, é notório que, quanto maior o ciclo, maior será a probabilidade de, no período das últimas operações agrícolas (fungicidas, inseticidas e colheita), haver maior conteúdo de água no solo. Com isso, o tráfego durante essas operações tende a deformar fisicamente este solo, demandando uma série de operações para seu novo aplainamento, o que tende a afastar o uso destas cultivares pelos produtores. Da mesma forma, cultivares mais precoces (grupos de maturação mais baixos), devido ao seu ciclo mais curto, e sua menor capacidade de compensar os estresses sofridos no seu desenvolvimento podem responder de maneira bastante diferenciada aos diferentes sistemas de manejo do solo (convencional, escarificado e em camalhões) quando comparadas a ciclos médios ou semi-tardios.

4.4. Manejo do solo de várzea

A introdução de rotação de culturas em áreas de cultivo de arroz irrigado é uma demanda atual dos últimos governos do Estado do RS (RODRIGUES, 2015). Pesquisas sobre o uso de camalhões e/ou sulcos vêm sendo desenvolvidas por entidades como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (SILVA et al., 2007), o Instituto Riograndense do Arroz (ALBERTI et al., 2013) e por Universidades e Institutos Federais.

A agricultura mundial, sobretudo nos países menos desenvolvidos, terá que aumentar a eficiência de conversão dos fatores de produção em alimentos, fibras, energia dado o aumento na população mundial e a previsão de escassez dos recursos hídricos (ROCKSTRÖM et al., 2007; FALKENMARK et al., 2009). A utilização eficiente dos fatores de produção pela planta depende de interações complexas de inúmeros processos do sistema solo-planta-atmosfera. O manejo do solo deve proporcionar um ambiente para o crescimento radicular que minimize os estresses por níveis

inadequados de fatores como água, nutrientes, elementos tóxicos, pH, oxigênio, temperatura, resistência mecânica, etc. Normalmente, uma estrutura de solo permeável ao sistema radicular diminui o nível da maioria dos estresses, sobretudo os físicos (água, ar, temperatura e resistência mecânica) (LETEY 1985; CLARK et al., 2003).

No Rio Grande do Sul, as culturas de sequeiro estão avançando nas áreas de várzea sobre áreas onde o cultivo do arroz já ocorreu. Dessa forma, devido às intensas operações de preparo, há uma ocorrência generalizada de uma camada compactada subsuperficialmente (pé-de-grade) devido ao intenso tráfego e ao manejo mecânico excessivo do solo em condições de umidade inadequada nestas áreas (PINTO et al., 2004). Na cultura do arroz a ocorrência desta camada com reduzida porosidade de aeração e baixa condutividade hidráulica é benéfica, pois reduz o consumo de água ao longo do ciclo da cultura irrigada por inundação. Porém, para estes cultivos de sequeiro, é justamente esta camada que impede a infiltração de água, reduz o volume de solo explorado pelo sistema radicular e mantém a área sob condições de encharcamento por um período maior de tempo.

A compactação modifica a estrutura do solo, o que pode resultar em problemas no estabelecimento e desenvolvimento das culturas (IMHOFF, 2002). Em solos compactados, a densidade é elevada e a porosidade total reduzida, principalmente pela redução na macroporosidade (SOANE & OUWERKERK, 1994; LIMA et al., 2006; REICHERT et al., 2009). Por essas alterações, a resistência do solo à penetração se eleva (SILVA et al., 2000b; REICHERT et al., 2009), o que pode restringir o desenvolvimento radicular das culturas caso alcance valores mais elevados. Em seus trabalhos, Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998), Tavares Filho et al. (2001), Lapen et al. (2004) e Silva et al. (2008) afirmam que o valor de resistência do solo à penetração de 2,0 MPa tem se mostrado restritivo ao desenvolvimento radicular das plantas. A compactação também afeta o comportamento físico-hídrico do solo. Quando o solo está compactado, o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo é aumentado, enquanto a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são reduzidas. Por consequência, o escoamento superficial pode aumentar e o crescimento de plantas pode ser reduzido em virtude da diminuição da disponibilidade de água, restrição ao crescimento das raízes e aeração deficiente (DEXTER, 2004; REICHERT et al., 2007; REICHERT et al., 2009).

Propriedades físicas do solo, como densidade e porosidade (PEDROTTI et al., 2001; PAULETTO et al., 2005; LIMA et al., 2006; LIMA et al., 2008, BAMBERG et al., 2009), agregação (BORGES et al., 2003; LIMA et al., 2003; REICHERT et al., 2006) e resistência do solo à penetração das raízes (BORGES et al., 2004) foram estudadas em solos de várzea. De maneira geral, os resultados mostram que o uso do solo ocasiona aumento na densidade, redução na porosidade total, macroporosidade e agregação do solo.

Diante disso, além da busca por cultivares mais adaptadas a condição de excesso hídrico e encharcamento do solo, deve-se investigar, como alternativa, manejos do solo que vislumbrem um maior crescimento radicular, seja pelo rebaixamento da camada de impedimento, via escarificação mecânica, seja pela elevação do sistema radicular, via semeadura em camalhão.

O uso de hastes sulcadoras pode influenciar no microambiente próximo à semente (DRESCHER et al., 2011), modificando a emergência das plântulas e o teor de água no solo (KOAKOSKI et al., 2007). Koakoski et al. (2007), avaliando dois mecanismos rompedores do solo encontraram efeito do mecanismo na profundidade de semeadura, na distância entre as sementes e no índice de velocidade de emergência na soja, observando-se maior profundidade de deposição das sementes no mecanismo tipo haste sulcadora e menor distância entre as sementes em relação ao disco duplo. Além disso, o mecanismo rompedor haste sulcadora proporcionou maior porosidade do solo e menor resistência à penetração mecânica. Nesse sentido, Drescher et al. (2011), encontraram que o mecanismo tipo haste sulcadora somado aos discos de rompimento do solo foram efetivos em aumentar a macroporosidade, diminuir a microporosidade e a densidade do solo, atenuando a compactação do solo, porém, apenas na região de crescimento das raízes. Tais mecanismos, mesmo que efetivos a uma pequena profundidade e volume de solo modificado são importantes, pois além de atuar na descompactação do solo, o que proporcionará melhoria nas condições físico-hídricas do solo, proporcionam profundidade adequada de deposição das sementes, bem como distribuição uniforme da semente na linha de semeadura (KOAKOSKI et al., 2007).

O uso de equipamento tipo escarificador com o objetivo de rompimento da camada compactada resultou que a escarificação efetuada em torno de 25 cm de profundidade, proporcionou elevação da produtividade de soja em área de várzea de cerca de 23% em relação aos tratamentos não escarificados (MARCHEZAN et al.

2013). Os autores verificaram que a resposta de produtividade pode ser explicada, em parte pela maior massa seca de nódulos, de raízes, de parte aérea e teor de clorofila da planta na área escarificada quando comparada ao plantio não escarificado.

A utilização de camalhões é outra forma de tentar melhorar o ambiente radicular ao desenvolvimento da soja em várzea. O cultivo em camalhão é um método simples e fácil de evitar o excesso de umidade do solo, sendo muito eficaz para evitar alagamentos na superfície do solo. Esta prática de manejo tem sido validada para aumentar o crescimento das raízes e a nodulação e, assim, a capacidade de absorção de N devido ao aumento da fixação do N_2 (TAKAHASHI et al., 2006). Embora a amontoa ou a formação de camalhões seja tradicionalmente demorada e trabalhosa, o recente desenvolvimento de máquinas capazes de simultaneamente realizar todos os procedimentos de plantio, incluindo amontoa, cultivo, adubação e semeadura facilita a adoção deste método.

Muitos são os estudos que caracterizam o efeito do alagamento na morfologia e fisiologia da cultura da soja, porém são quase inexistentes os esforços em compreender o cultivo de milho e principalmente de forrageiras. Apesar disso, torna-se claro qual o rumo que o melhoramento genético da soja deve tomar para contribuir no desenvolvimento do cultivo nestes ambientes. Contribuições mais imediatas podem ocorrer por meio do manejo e preparo do solo, enquanto o melhoramento genético não tem resultados definitivos de espécies mais adequadas às condições de alagamento. Estudos que relacionam a deficiência de oxigênio no solo ocasionado pela inundação, em diferentes manejos do solo com o desempenho agrônômico de soja, milho e forrageiras ainda são pouco explorados pelos pesquisadores. Assim, o estudo de sistemas de manejo que favoreceram o crescimento radicular e reduzam a hipóxia são escassos e extremamente necessários a fim de viabilizar os cultivos de sequeiro nestas áreas.

5. Material e Métodos

5.1. Áreas de estudo e estratégia de ação dos tratamentos

O estudo foi conduzido no ano agrícola 2014/2015 (ANO I) apenas com o cultivo de soja e no ano agrícola 2015/2016 (ANO II) com o cultivo de soja e milho, constituindo experimentos individuais e posteriormente no período hibernal de 2016 foram cultivadas as espécies forrageiras aveia preta (*Avena strigosa*), azevém (*Lolium multiflorum*) e consórcio (aveia preta + azevém) em sucessão a soja.

O clima da região de Alegrete, segundo a classificação de Köppen é do tipo Cfa - subtropical úmido, sem estação seca e com temperaturas médias variando de 14,3 °C no inverno a 26,3 °C no verão, com média de precipitações anuais de 1400 mm (MORENO, 1961), porém registros de pluviômetro de leitura direta em propriedade lindeira ao local do experimento conduzido no ANO I indicam precipitações anuais médias de 1930 mm (média de 44 anos) (Arquivo pessoal).

O estudo do ANO I foi conduzido no campo experimental de várzea na Agropecuária Nemitz, no município de Alegrete, Rio Grande do Sul (RS), região fisiográfica da Fronteira Oeste a uma altitude de 79 m, latitude 29°39' 19.87" S e longitude 55° 25' 55.44" O. O solo da área experimental é classificado, no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), como Gleissolo Melânico, cuja a análise granulométrica indicou textura argila siltosa, com 0,04, 0,54 e 0,41 kg kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente.

No ANO II os experimentos foram executados também no município de Alegrete. Porém, a área experimental localiza-se na Agropecuária Boa Esperança, a uma altitude de 110 m, latitude 29°48'07,90" S e longitude 55°38'22,60" O. O solo da área experimental é classificado como Gleissolo Háptico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), cuja a análise granulométrica indicou textura franco arenosa, com 0,59, 0,22 e 0,19 kg kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente.

Os experimentos com a cultura da soja, nos ANOS I e II constaram de um delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições e tratamento bi-fatorial, onde as parcelas principais foram os sistemas de preparo do solo (convencional, escarificado e camalhão) com 64 m² cada (8 m x 8 m) e as sub-parcelas foram quatro cultivares de soja de diferentes Grupos de Maturação (GM): 5,0 – 5,4 (hiper-precoce);

5,5 – 5,9 (precoce); 6,0 – 6,4 (médio); 6,5 – 6,9 (semi-tardio). As sub-parcelas constaram de 4 linhas de cada cultivar com 8 m de comprimento (2 m x 8 m). No ANO II optou-se por adicionar o sistema de preparo escarificado+camalhão, totalizando quatro parcelas principais denominadas CONV, ESC, CAM e ESC+CAM para os tratamentos convencional, escarificado, camalhão e escarificado+camalhão, respectivamente.

A inexistência de um sistema de manejo que envolva a semeadura direta sobre a palha decorre da característica imposta pela cultura do arroz à rotação com culturas de sequeiro. As operações de colheita e retirada dos grãos de arroz da lavoura ocorrem, na maioria dos casos, em condições de excesso de umidade no solo. Isso tende a deformá-lo drasticamente (Figura 1). Aliado a isso, permanecem muitas “taipas” sem serem desmanchadas. Durante o inverno, devido à baixa evapotranspiração, poucos são os momentos aptos para as operações de preparo e aplainamento, o que, na maioria das vezes, impossibilita a semeadura de culturas hibernais logo após o cultivo do arroz.



Figura 1. Colheita e transporte de grãos de arroz. Fonte: Lauro Alves/Agência RBS

As figuras a seguir ilustram as mudanças estruturais do solo almejadas pelos diferentes tratamentos. As características hídricas e de estruturação do solo

provenientes de um sistema de preparo convencional, no qual muitos estudos evidenciam a existência de uma camada compactada em subsuperfície (MARCHESAN et al., 2013; MENTGES et al., 2013; MULLER, 2015) reduzem a taxa de infiltração (Figura 2). A semeadora causa uma pequena mobilização de solo apenas na camada superficial e não atinge a camada compactada. Com isso, a quantidade de solo disponível para ser explorada pela raiz e a quantidade de água armazenada pelo solo são reduzidas. Como a água tem dificuldade para passar pela camada compactada, a camada superior do perfil ficará por um maior tempo na condição de saturação ou até mesmo com uma lâmina d'água na sua superfície, o que dificulta a aeração do solo causando estresse hídrico ou morte da planta de acordo com a intensidade do evento pluviométrico.

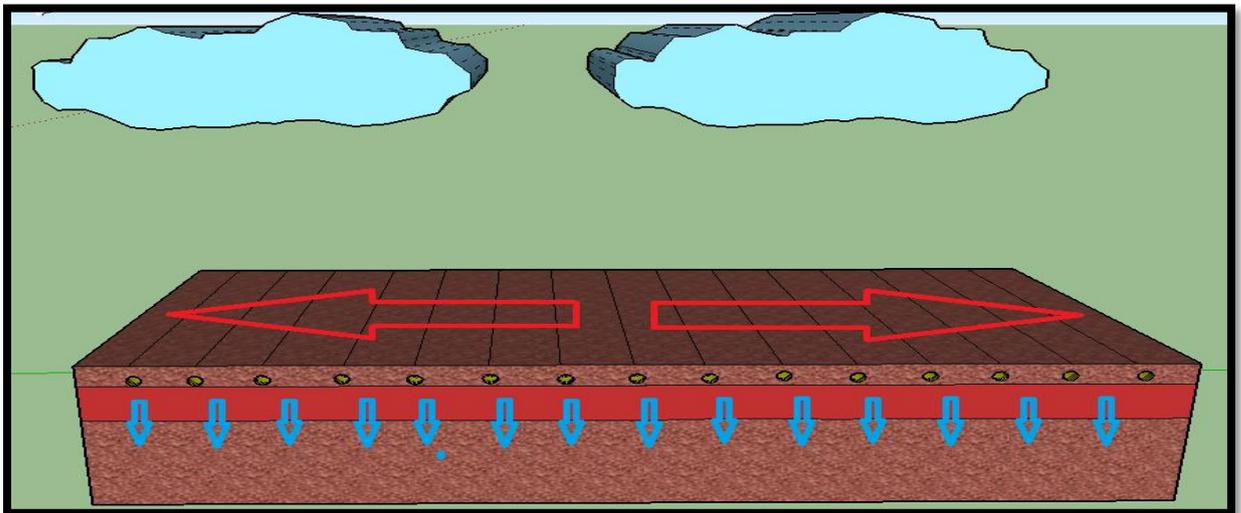


Figura 2: Semeadura e preparo do solo convencional.

A estruturação do solo almejada com o sistema de preparo escarificado proporciona a remoção da camada compactada em subsuperfície (Figura 3), o que favorece a taxa de infiltração, aumentando a quantidade de solo disponível para ser explorada pelo sistema radicular e a quantidade de água armazenada pelo solo é maior, uma vez o mesmo irá infiltrar mais água. Com a infiltração elevada, o tempo de exposição ao estresse hídrico tende a ser menor, o que favorece a aeração do solo.

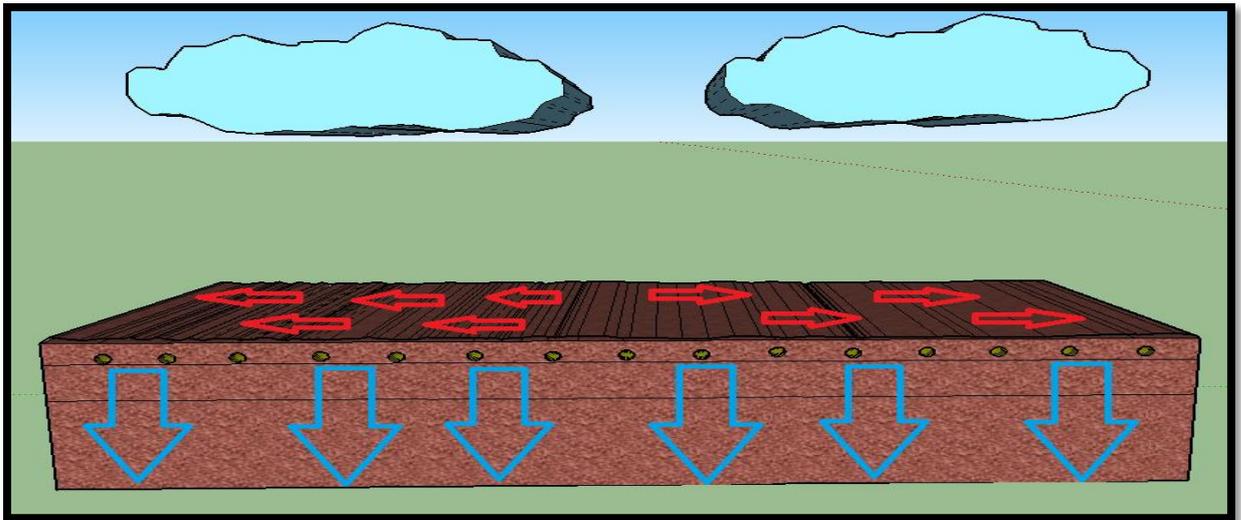


Figura 3: Semeadura e preparo do solo escarificado.

O arranjo estrutural do solo esperado com o sistema de preparo em camalhão, no qual exista a presença da camada compactada em subsuperfície, permanece com uma reduzida taxa de infiltração (Figura 4). No entanto, a semeadora camalhoneira gera uma mobilização de solo que propicia a criação de um camalhão, que eleva o sistema radicular das plantas e melhora a aeração na camada superficial. Essa operação também não remove a camada compactada e, com isso, a quantidade de água armazenada pelo solo é reduzida e o espaço para o desenvolvimento das raízes é melhor em comparação com CONV mas ainda limitado pela camada compactada. Como a água tem dificuldade para passar pela camada compactada, a camada superior do perfil ficará na condição de saturação ou até mesmo com uma lâmina d'água na sua superfície; no entanto, como houve uma elevação do sistema radicular esse tempo de exposição ao excesso de água tende a ser menor se comparado ao CONV.

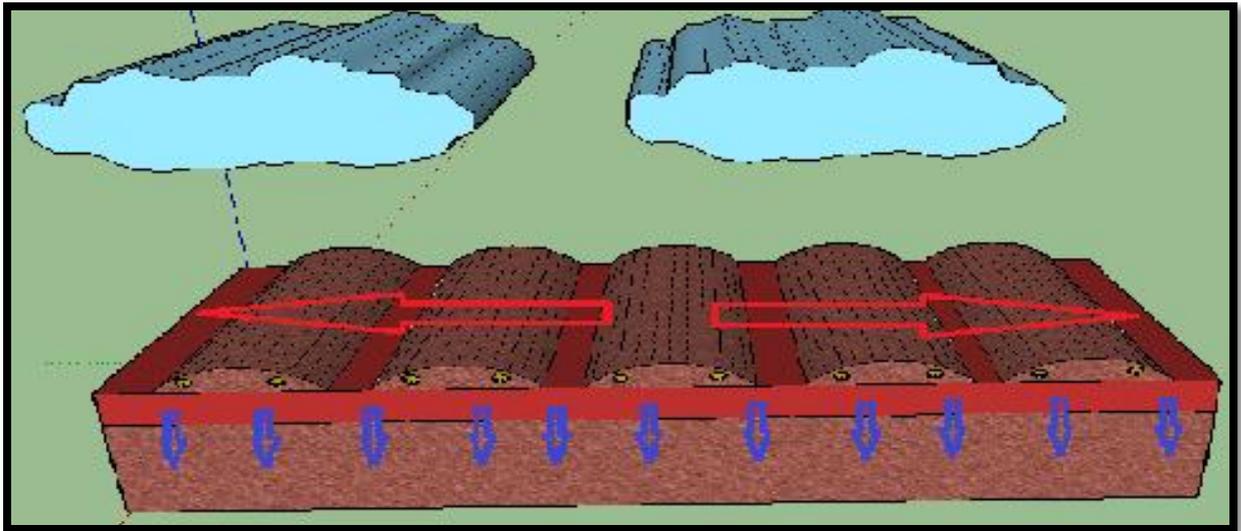


Figura 4: Semeadura e preparo do solo em camalhões.

No sistema de preparo escarificado com a semeadura em camalhões, a estruturação do solo almejada com a qual a camada compactada em subsuperfície foi removida, favorece a taxa de infiltração (Figura 5). Além disso, aumenta-se a quantidade de solo disponível para ser explorada pelo sistema radicular que foi elevado pelo uso de camalhões. Com a infiltração maior e o sistema radicular elevado o tempo de exposição ao estresse hídrico é menor comparado aos demais tratamentos, o que favorece a aeração do solo e o desenvolvimento da cultura.

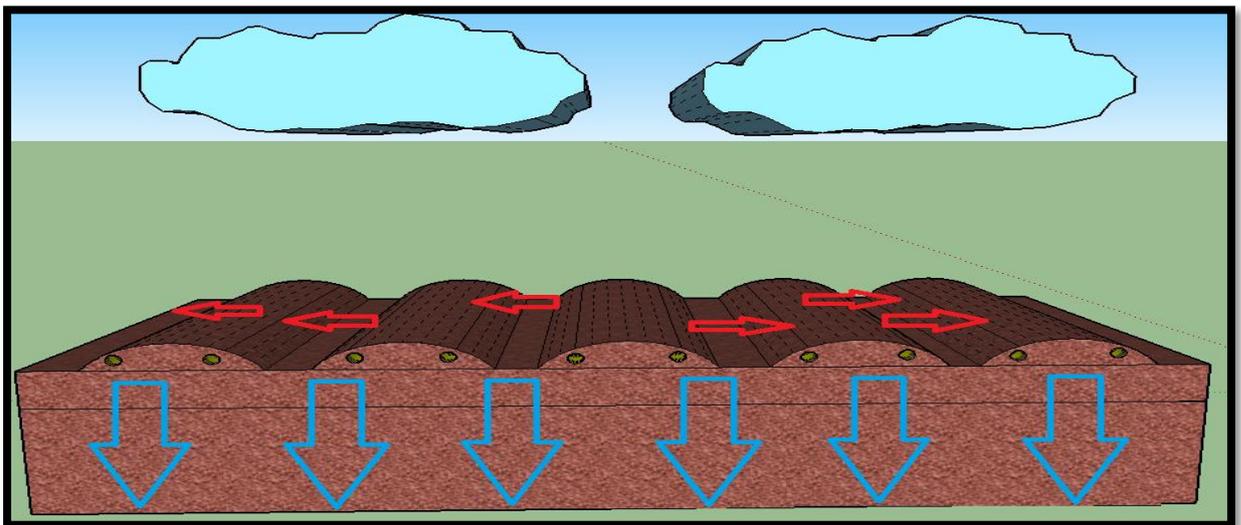


Figura 5: Semeadura e preparo do solo escarificado + camalhões.

Ambas as áreas foram cultivadas com arroz nos anos anteriores. Os preparos impostos para os experimentos foram feitos antes da semeadura da cultura da soja no ANO I e soja e milho no ANO II.

Nas parcelas principais, o sistema CONV constou de uma gradagem aradora e um aplainamento do solo realizado com plaina niveladora multilâminas (remaplam).

O sistema ESC constou de uma escarificação a uma profundidade efetiva de 30 cm (Figura 6). A semeadura no CONV e no ESC foi realizada com semeadora SAM 200.



Figura 6. Escarificação realizada no ANO I. Conjunto Trator Massey Ferguson 7150 + Escarificador 9 hastes.

O sistema de cultivo CAM foi implantado após um aplainamento do solo realizado com plaina niveladora multilâminas e a semeadura com a utilização de uma semeadora KF 8/5 Camalhoneira (Figura 7) com a função de amontoa (criação do camalhão), cultivo, adubação e semeadura em apenas uma operação.

No sistema ESC+CAM, realizou-se, primeiramente, uma escarificação (profundidade efetiva de 30 cm) e posteriormente fora realizada a semeadura também com a utilização de uma semeadora KF 8/5 Camalhoneira.

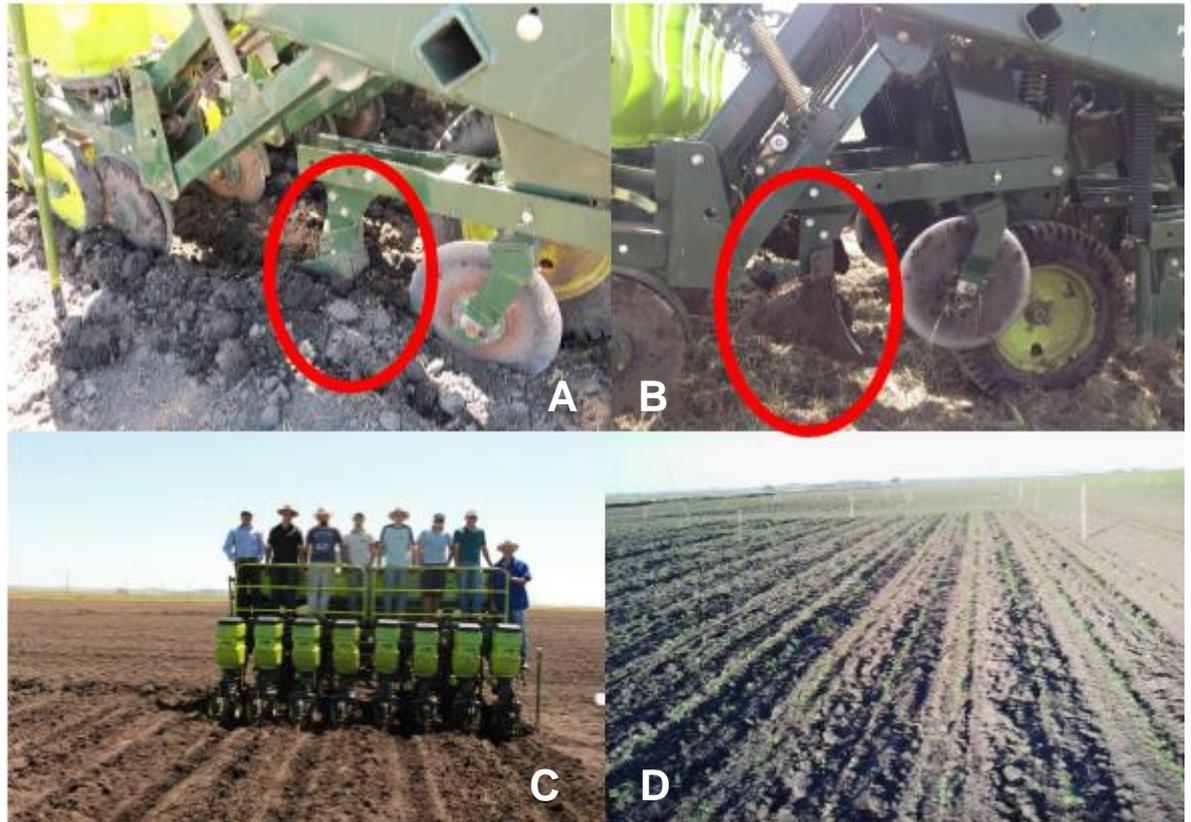


Figura 7. Semeadora KF 8/5 Camalhoneira (C) com detalhe da aiveca utilizada para construção dos camalhões (A) e (B) e área com camalhão na emergência das plântulas de soja (ANO I) (D).

No ANO I a semeadura da cultura da soja foi realizada no dia 15 de novembro de 2014 e, para as sub-parcelas, a escolha das cultivares mais tolerantes dos diferentes GM foi determinada conforme experimento realizado na mesma área na safra 2013/2014.

Neste experimento, foram utilizados 42 cultivares de soja registrados no Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento de diferentes ciclos de maturação (fornecido pelos obtentores) em um experimento com delineamento blocos ao acaso com 3 repetições (LIMA et al., 2014a; LIMA et al., 2014b). A partir do ranqueamento de produtividade das cultivares posicionadas nos distintos ciclos de maturação, foram escolhidas as 4 cultivares mais tolerantes ao alagamento conforme o ciclo (uma para cada ciclo). As cultivares semeadas foram **NS 4823** para GM 5,0 – 5,4; **MSOY 5917 IPRO** para GM 5,5 – 5,9; **BMX Vanguarda 6160 RSF IPRO** para GM 6,0 – 6,4 e **BMX Ponta 7166 RSF IPRO** 6,5 – 6,9.

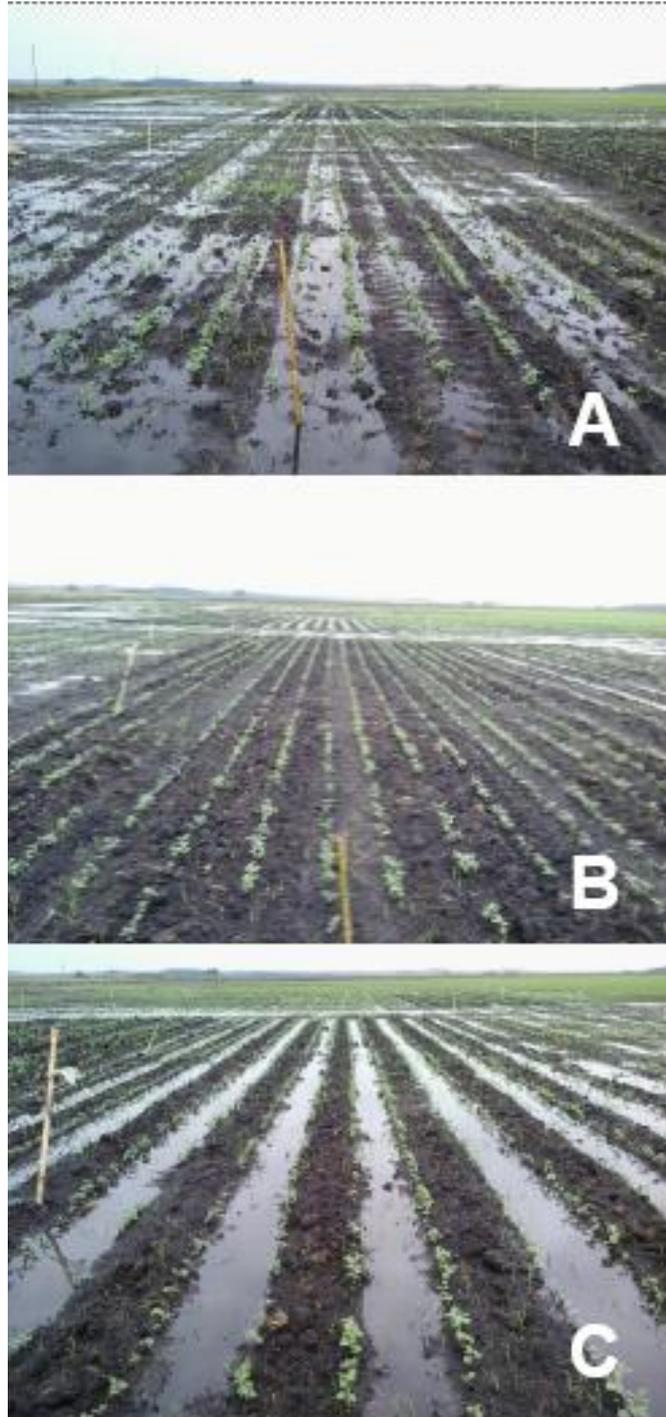


Figura 8. Parcelas com tratamento CONV (a), ESC (b), CAM (c) em 03/12/2014 após uma chuva de 68 mm.

As precipitações pluviais ocorridas nos dias 16 (60 mm), 20 (62 mm), 26 (72 mm), 27 (63 mm) e 30 (68 mm) de dezembro 2014 e 1º de janeiro de 2015 (60 mm) totalizaram 385 mm. Devido a isso, a área experimental ficou submersa durante 7 dias (Figura 9.a) e, após esse período, apenas a cultivar **DM 7166 RSF IPRO** conservou-se com número de plantas suficientes ao estabelecimento da cultura (Figura 9.b; 9.c;

9.d). Assim, o experimento foi conduzido a partir deste período com apenas uma cultivar.

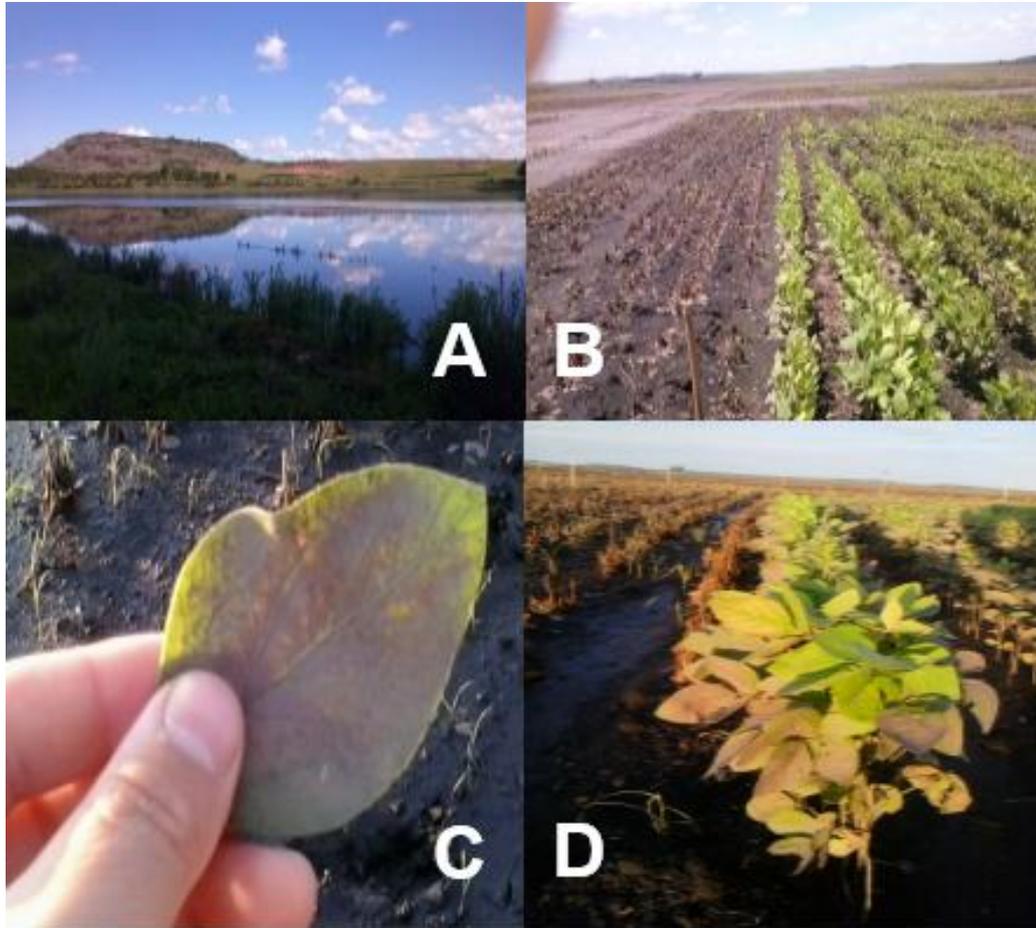


Figura 9. Vista externa da área experimental durante período de alagamento (A); visão da parcela com a cultivar que se conservou após o período de alagamento (B); detalhe de folíolo de soja coberto com sedimento de solo (C); cultivar sobrevivente com trifólios novos (D).

Durante o ANO I, também fora conduzido pelo Grupo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Agricultura de Conservação (GEPEAC) do Instituto Federal Farroupilha – Campus Alegrete, um ensaio com 39 cultivares na mesma área experimental. Este ensaio teve as mesmas condições de precipitações descritas acima e, após o período de inundação, 9 cultivares conservaram-se com número de plantas suficientes ao estabelecimento da cultura (Dados ainda não publicados).

Para o ANO II, como nenhuma das cultivares sobreviventes pertencia ao GM 5,0 – 5,4, a cultivar **NS4823** foi utilizada novamente. Para os demais GM, foram utilizadas as cultivares **FPS Solimões** para GM 5,5 - 5,9; **TEC IRGA 6070** para GM 6,0 – 6,4 e novamente **BMX Ponta 7166 RSF IPRO** para GM 6,5 – 6,9.

Para a cultura do milho, foi utilizada a variedade Syngenta Maximus Viptera 3. Tanto o ensaio de soja quanto o de milho foram semeados no dia 7 de dezembro de 2016.

No ANO II, a semeadura das culturas da soja e do milho precisou ser atrasada devido às chuvas ocorridas nos meses de outubro e novembro. Neste período, na área experimental, a primeira vez em que ocorreram condições adequadas de umidade no solo para realizar a semeadura deu-se apenas entre 5 a 9 de dezembro de 2015. Neste período, os experimentos (ANO II) foram instalados e as primeiras coletas de solo e análises obtidas.

Após a colheita da soja, as parcelas principais foram sub-divididas, nas quais a semeadura foi realizada em superfície no dia 25 de maio de 2016, em três sub-parcelas com Aveia Preta (Av), Azevém (Az) e Consórcio de Aveia Preta e Azevém (Av+Az).

Os tratos culturais empregados seguiram as recomendações técnicas para a cultura da soja (REUNIÃO..., 2014), milho (REUNIÃO..., 2013) e forrageiras (FONTANELI et al., 2012) para o estado do Rio grande do Sul.

5.2. Propriedades físico-hídricas do solo

A fim de avaliar o efeito dos diferentes sistemas de manejo do solo de várzea na manutenção, ao longo do ciclo, de um ambiente físico adequado ao crescimento de plantas foram feitas as medições descritas a seguir (exceto granulometria) em três momentos distintos no ciclo da cultura: na semeadura, 45 e 140 dias após o preparo e semeadura das parcelas em ambos os anos de execução do experimento.

Para a escolha do momento ideal para a coleta, foram considerados o número, a intensidade e o volume dos eventos de precipitação pluvial registrados no período entre a semeadura e a segunda coleta, uma vez que a intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem do solo promovem a reconsolidação do mesmo.

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0 – 5 cm; 5 – 10 cm; 10 – 20 cm e 20 – 30 cm. No centro de cada camada, as amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em cilindros metálicos com 5,7 cm de diâmetro e 4 cm de altura, para determinar a densidade do solo (Ds), a porosidade total (PT), a macroporosidade (Ma), a microporosidade (Mi) e a condutividade hidráulica do solo saturado (ksat). Nas mesmas camadas, amostras de solo com

estrutura não preservada foram coletadas para determinar a distribuição granulométrica.

As amostras de solo com estrutura preservada foram preparadas em laboratório, retirando-se cuidadosamente o excesso de solo das faces superior e inferior dos cilindros metálicos. Posteriormente, as amostras foram saturadas por capilaridade e pesadas, sendo em seguida, submetidas à tensão de 6 kPa em coluna de areia (REINERT & REICHERT, 2006). Ao final, as amostras foram mantidas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante, para determinação da densidade do solo (Ds).

A quantidade de microporos foi determinada com base na água retida na tensão de 6 kPa e a quantidade de macroporos foi determinada pela diferença entre o volume de água retido na saturação e o volume de água retido na microporosidade.

As amostras de solo com estrutura deformada foram secas ao ar livre, peneiradas em peneira com abertura de malha de 2 mm e, posteriormente, utilizadas para a determinação da distribuição do tamanho de partículas do solo pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997, modificado por SUZUKI et al., 2015). Para a determinação da distribuição do tamanho de partículas, a dispersão das amostras de solo foi realizada por agitador horizontal com 120 rpm durante 4 horas, utilizando vidros de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6% (dispersante químico), 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de 1,11 g cm⁻³ (SUZUKI et al., 2015).

Para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat), as amostras de solo com estrutura preservada foram preparadas e saturadas por capilaridade durante 24 h. A Ksat foi determinada em laboratório, com saturação por capilaridade por 48 h e posterior análise de acordo com o método descrito em Embrapa (1997) e modificado. Para tanto, foi utilizado um permeâmetro de carga constante, onde o volume de água percolado das amostras foi medido em três momentos com intervalos de cinco minutos após o início da percolação.

A capacidade de infiltração de água no solo foi determinada pelo método dos anéis concêntricos (BERNARDO et al., 2006). Este consiste na inserção, na superfície do solo, de dois cilindros concêntricos com diâmetros diferentes (Figura 10). Esse arranjo proporciona a delimitação de dois compartimentos que serão preenchidos com água: o compartimento externo, delimitado pela parede interior do cilindro de maior diâmetro e pela parede exterior do menor cilindro, e o compartimento interno,

totalmente delimitado pela parede interior do cilindro menor. Durante a execução do ensaio, a água infiltrada no solo a partir do compartimento externo apresenta uma tendência natural de fluir vertical e lateralmente. A saturação do solo nas porções imediatamente abaixo do compartimento externo permite que a água infiltrada a partir do compartimento interno infiltre predominantemente segundo a direção vertical.

A quantidade de água que infiltra no cilindro interno foi determinada por meio da realização de leitura em intervalos de tempo de 30 min. A taxa de infiltração estável (TIE) foi considerada como a média das últimas duas leituras, às 1 h e 30 min e às 2 horas, em razão da pequena variação da taxa de infiltração nesse tempo, proveniente do elevado conteúdo de água presente no solo.

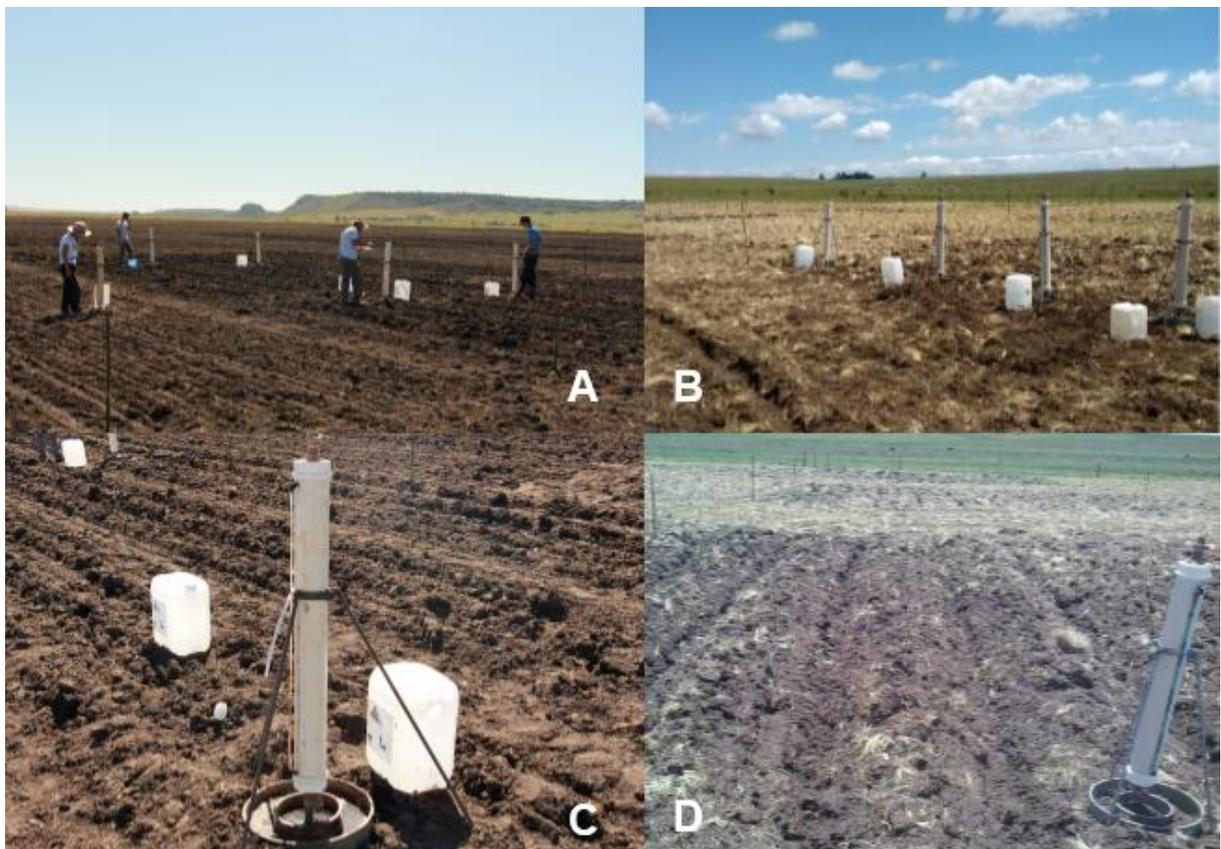


Figura 10. Ensaio de infiltração realizado no dia da semeadura nos ANO I (A) e ANO II (B) e detalhe do infiltrômetro de anéis concêntricos sobre tratamento ESC (C) CAM (D).

A resistência do solo a penetração (RP) foi avaliada somente no segundo momento mencionado acima e teve por finalidade apenas a comparação entre os sistemas de manejo do solo. A escolha para tal período deu-se em razão de que, a partir deste momento, o crescimento radicular torna-se mais intenso e barreiras físicas tendem a retardá-lo. Para tanto, foi utilizado um penetrômetro digital com ponta cônica

e armazenamento eletrônico dos dados a cada 1 cm até a profundidade de 30 cm. A determinação foi efetuada em todas as parcelas na linha de semeadura e a cada 0,10 m e 0,20 m para a esquerda e para a direita da linha de semeadura nos tratamentos convencional e escarificado e na linha de semeadura e apenas 0,10 m e 0,20 m da linha de semeadura para o lado do camalhão nas parcelas que envolvem este tratamento.

A rugosidade superficial aleatória e o desnível médio do camalhão foram determinados em campo, com o uso de um perfilômetro (Figura 11). O equipamento foi posicionado no sentido perpendicular as linhas de semeadura, sendo obtidas imagens que posteriormente foram plotadas em gráficos para a obtenção do desvio padrão dos valores de rugosidade. Para a determinação do desnível médio dos tratamentos que contenham camalhão, foram determinadas as leituras máximas e mínimas sequencias que compunham cada camalhão. Destas medidas realizou-se a diferença de desnível entre a crista (medida máxima) e o sulco (medida mínima) de cada camalhão. A partir destas, foram feitas as médias de desnível para cada parcela que compunham uma repetição.

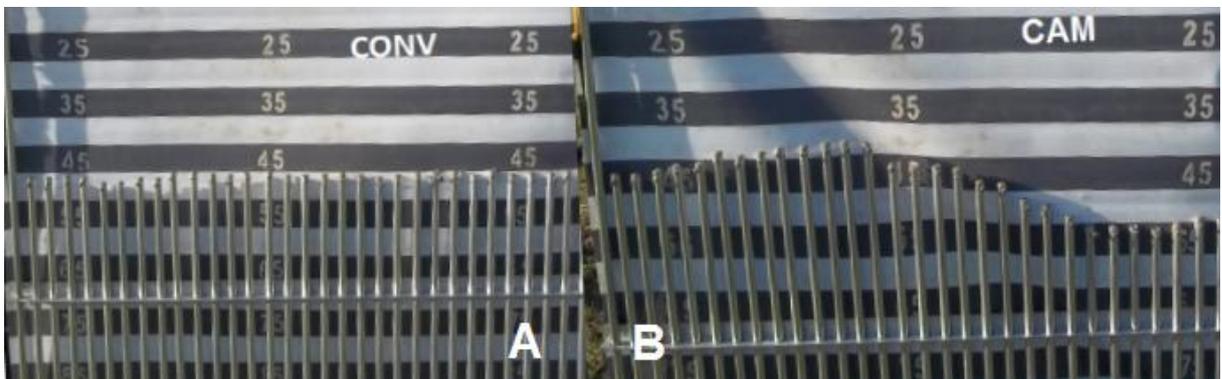


Figura 11. Perfilômetro de hastes para avaliação da Rugosidade superficial aleatória nos tratamentos CONV e CAM.

5.3. Análises de planta

Para avaliar o efeito dos sistemas de manejo nas áreas de várzea, o crescimento e a produtividade das plantas foram avaliados por meio do índice de clorofila, % de plantas estabelecidas e do rendimento de grãos para as culturas da soja e milho, além de índice de área foliar para a soja e rendimento de matéria seca para as forrageiras.

O alagamento é prejudicial para a fixação de N_2 , o que causa deficiência deste nutriente na planta, resulta em uma menor taxa fotossintética e, por consequência,

produção de matéria seca, o índice de clorofila foi avaliado para as culturas de soja (ANO I e II) e milho (ANO II) medido com auxílio de um medidor eletrônico do teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030 – FALKER, 2012) portátil. Este aparelho mede de maneira óptica, a quantidade de radiação transmitida através das folhas, em três comprimentos de onda, sendo eles: dois na faixa do vermelho (próximos aos picos de absorção da clorofila) e um no infravermelho próximo. A combinação destes valores de transmitâncias nos três diferentes comprimentos de onda gera o Índice de Clorofila Falker (IFC) que é a unidade de medida em índice adimensional do ClorofiLOG (FALKER, 2012), que em alguns aparelhos é chamada de SPAD. Para cada unidade experimental foram tomadas as medidas de dez folhas mais recentemente completas de três plantas. Este parâmetro foi avaliado quando as plantas se encontravam em estágio R5 para a soja (enchimento de grãos) e R3 para o milho (grão leitoso).

Dadas as limitações obtidas durante o estabelecimento das culturas no primeiro ANO I, o número de plantas estabelecidas foi determinado no ANO I apenas na cultivar sobrevivente e no ANO II para as culturas de milho e soja. Para tanto, foi quantificado o número médio de plantas estabelecidas por metro linear e a porcentagem de plantas estabelecidas conforme o número de sementes viáveis utilizadas.

O rendimento de grãos foi avaliado mediante a colheita das plantas em área total das parcelas, devido a heterogeneidade de estabelecimento de plantas nas unidades experimentais. Posteriormente, as plantas foram trilhadas e separadas para a determinação do rendimento de grãos corrigindo-as a 13% de umidade.

O rendimento de forragem foi determinado para avaliar a efetividade do uso de espécies forrageiras isoladas ou em consórcio em áreas de várzea (Figura 12). Para isso, foi determinada a massa de forragem disponível. Considerou-se a heterogeneidade provocada pelos tratamentos com camalhão. Dessa forma, foi coletado 1 m² (2 m x 0,5 m) por parcela de forma perpendicular ao sentido do camalhão uma vez que nos sulcos dos camalhões não houve estabelecimento de forrageiras. Posteriormente as amostras foram conduzidas a uma estufa de circulação de ar forçada, a 60 °C, até massa constante. Em seguida realizou-se a pesagem das amostras para a determinação da matéria seca vegetal.

O índice de área foliar foi determinado para avaliar o efeito dos sistemas de manejo em área de várzea no desenvolvimento vegetativo da cultura da soja. O índice de área foliar (relação de m² de área foliar por m² de superfície do solo) foi determinado no estágio fenológico R5 para a cultura da soja nos Anos I e II, sem a destruição de

plantas. Para isso fora utilizado o método de dimensões foliares, desprezando-se o dano foliar causado por doenças e insetos.



Figura 12. Vista aérea dos blocos com forrageiras e detalhe dos tratamentos utilizados.

5.4. Análise estatística

O modelo estatístico adotado foi o de blocos casualizados e parcelas subdivididas, com quatro repetições. No ANO II, foram considerados como parcelas principais os sistemas de manejo (CONV, ESC, CAM e ESC+CAM) e como subparcelas, os diferentes GM para a cultura da soja e as diferentes espécies e arranjos nos tratamentos com forrageiras. Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos, a 5% de probabilidade de erro, as diferenças entre as médias dos sistemas de manejo foram comparadas pelo teste de Tukey.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Condições climáticas

Os anos agrícolas 2014/2015 e 2015/2016 caracterizaram-se pela grande influência do fenômeno “El niño” no regime de precipitações da região Sul do Brasil. O fenômeno foi considerado como o segundo mais forte nos últimos 66 anos (CLIMATEMPO, 2016). Durante o período de semeadura da cultura da soja, em 2014, o fenômeno ainda não havia atingido seu ápice, mas as chuvas ocorridas nos meses de novembro, dezembro e janeiro foram superiores à média histórica dos últimos 30 anos em 67, 253 e 105%, respectivamente (Figura 13). Neste período, que abrangeu a semeadura, a germinação e o crescimento inicial da cultura da soja, ocorreu a morte de plantas (incluindo 100% de algumas cultivares; detalhes descritos no item metodologia) no experimento do ANO I. Porém, nos meses subsequentes (fevereiro e março), a chuva acumulada foi de 101 mm no mês de fevereiro e de apenas 74 mm no mês de março. Esse comportamento proporcionou o crescimento das plantas restantes em condições mais favoráveis ao seu desenvolvimento.

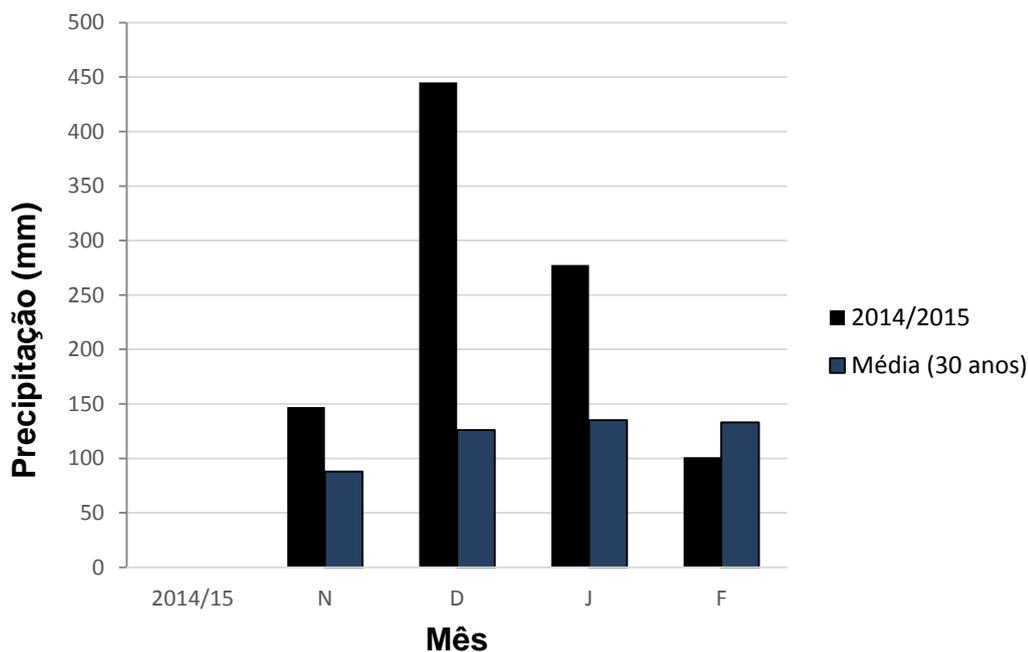


Figura 13. Precipitação pluvial mensal durante o ANO I.

No ANO II, após a semeadura (07/12/16), nos dias 9 (35 mm), 12 (55 mm), 14 (22 mm), 18 (85 mm), 21 (66 mm), 22 (70 mm), 23 (65 mm), 24 (37 mm) e 27 (62 mm) ocorreram chuvas que somadas atingem 497 mm (Figura 14). Esse valor é 294% superior à média histórica dos últimos 30 anos (1986 – 2016). Os meses seguintes

tiveram chuvas acumuladas que margearam a média histórica, porém muito regulares, que registraram apenas dois períodos sem a ocorrência de chuvas em um prazo de 10 dias (14/02/2016 – 01/03/2016 e 25/04/2016 a 14/05/2016).

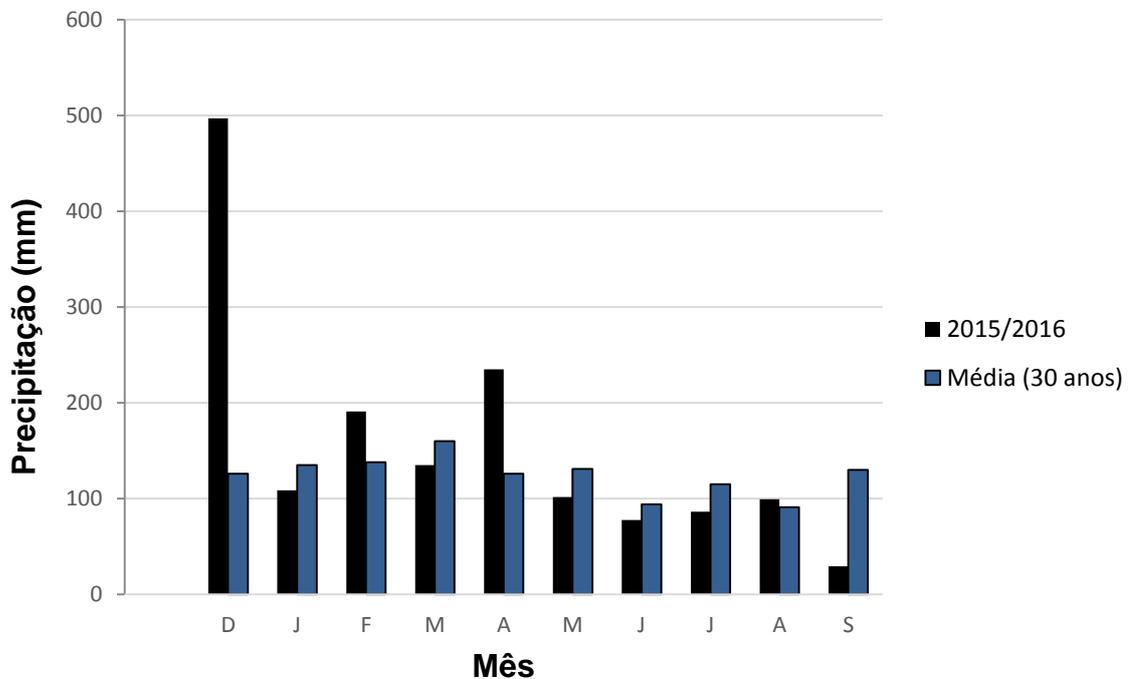


Figura 14. Precipitação pluvial mensal durante o ANO II.

6.2. Densidade, porosidade e condutividade hidráulica do solo

No ANO I, no momento da semeadura da cultura da soja, os diferentes sistemas de manejo não proporcionaram diferenças estatísticas, independente da camada avaliada, para as propriedades D_s , PT e M_i , enquanto a Ma e K_{sat} diferiram estatisticamente nas camadas 0,05 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m.

A D_s média foi de 0,63; 0,72; 0,80 e 0,84 $g\ cm^{-3}$ para as camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. A densidade crítica, definida quando o Intervalo hídrico ótimo é igual a zero (D_{scIHO}), vem sendo empregada como indicadora de compactação crítica para o crescimento de plantas. A D_{scIHO} parece ter boa associação com o teor de argila (REICHERT et al., 2009), cuja equação $D_{scIHO} = -0,00078 * Argila + 1,83803$ ($r^2=0,92$) foi obtida pelos autores. Para este solo,

a D_{sclHO} é de $1,52 \text{ g cm}^{-3}$ e, independente da camada avaliada, os valores de D_s obtidos são bem inferiores a D_{sclHO} .

A ausência de diferença estatística na M_i , entre os sistemas de manejos, também foi observada por Drescher et al. (2011) e Prado et al. (2014). Mesmo em tratamentos revolvidos, agregados maiores e bem estruturados permanecem, mesmo após o preparo do solo ocasionando diferenças mais marcantes na macroporosidade do solo do que na microporosidade.

Na camada 0,00-0,05 m, os sistemas de manejo não proporcionaram nenhuma diferença nas propriedades D_s , PT , Ma , M_i e K_{sat} . Porém, deve-se ressaltar que independente do sistema de manejo, houve leve mobilização na camada superior do solo, o que proporcionou maiores valores de Ma .

A K_{sat} foi coerente com a Ma , onde os maiores valores de K_{sat} foram observados nas mesmas camadas e sistemas de manejo em que foram observados os maiores valores de Ma .

Nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m é possível perceber a influência da escarificação no aumento da Ma e da K_{sat} (Tabela 1), o que não se reflete nas demais propriedades. Na camada de 0,05-0,10 m, apesar de a Ma não diferir entre os sistemas ESC e CAM, que por sua vez não diferi de CONV, a K_{sat} é superior no sistema ESC, sendo 4 e 7 vezes superior quando comparada aos tratamentos CONV e CAM, respectivamente. Já na camada de 0,10-0,20 m, apesar de a Ma ser superior em ESC e CAM, tal alteração estrutural não reflete em aumento da K_{sat} em CAM, uma vez que somente ESC proporciona valores elevados desta propriedade.

Na última camada avaliada, assim como na primeira, não houve diferença significativa em nenhum dos sistemas de manejo avaliados. Porém, apesar da manutenção de elevados valores de PT , a Ma é baixa em todas os tratamentos, com valores inferiores a $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, o que pode ser prejudicial ao desenvolvimento das culturas de sequeiro, devido à pouca disponibilidade de oxigênio para as raízes (FERREIRA, 2010). Devido a elevadas condições de umidade, ainda mais persistentes nestas áreas e devido ao nível elevado do lençol freático, percebe-se que o escarificador não desempenha papel efetivo na melhoria das propriedades físicas (D_s , Ma , M_i , PT e K_{sat}) em camadas mais profundas, criando apenas uma fissura nestas camadas (MULLER, 2015).

Tabela 1. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado no momento da semeadura. ANO I. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	Camada (cm)	Ds		PT		Ma		Mi		Ksat	
CONV	0 - 5	0,63	ns	0,69	ns	0,22	ns	0,47	ns	24,15	ns
ESC		0,64		0,70		0,24		0,45		21,18	
CAM		0,62		0,68		0,23		0,45		17,87	
CV(%)		6,02		2,42		14,10		5,25		13,89	
CONV	5 - 10	0,75	ns	0,65	ns	0,14	b	0,50	ns	7,99	b
ESC		0,69		0,67		0,20	a	0,47		32,51	a
CAM		0,71		0,65		0,17	ab	0,48		4,59	b
CV(%)		9,47		2,28		14,45		4,78		30,38	
CONV	10 - 20	0,79	ns	0,62	ns	0,10	b	0,52	ns	0,98	b
ESC		0,77		0,66		0,16	a	0,50		27,31	a
CAM		0,83		0,68		0,16	a	0,52		0,25	b
CV(%)		7,68		8,57		14,50		3,13		30,22	
CONV	20 - 30	0,82	ns	0,62	ns	0,08	ns	0,54	ns	0,63	ns
ESC		0,84		0,62		0,09		0,53		0,41	
CAM		0,85		0,62		0,08		0,54		0,44	
CV(%)		8,17		4,44		15,50		3,17		58,33	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns = não significativo para o teste de Tukey ($p < 0,05$); CV = coeficiente de variação. CONV = preparo e semeadura convencional; ESC = escarificação e semeadura convencional; CAM = preparo convencional e semeadura em camalhões. Ds = Densidade do solo (g cm^{-3}); PT = Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Mi = Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ma = Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ksat = Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}).

Devido ao excesso de chuva ocorrido entre os dias 25 de dezembro de 2014 e 01 de janeiro de 2015 (Figura 13), foi necessário estender o período para coleta destes resultados em 10 dias totalizando 55 dias após a semeadura. Da mesma forma, devido ao excesso de umidade no solo pela posição elevada do lençol freático, não foi possível coletar amostras indeformadas nas camadas inferiores a 10 cm, nos tratamentos CONV e CAM, havendo esta possibilidade apenas no tratamento ESC.

Após 55 dias das operações de preparo e semeadura, percebeu-se um comportamento diferenciado dos sistemas de manejo quanto às propriedades do solo. A camada 0,00-0,05 m, que logo após a semeadura, independente do sistema de manejo, mostrou valores mais baixos de Ds e elevados de Ma e Ksat, sofreu um processo de acomodação mais acentuado no sistema de manejo CONV, com

elevação da Ds e redução da Ma, quando comparada aos demais sistemas (Tabela 2). Além disso, a Ksat reduziu, aproximadamente, 80% em relação à primeira época avaliada (logo após a semeadura).

Na segunda camada (0,05 – 0,10 m), as diferenças entre os sistemas de manejo visualizadas na semeadura permanecem, sendo o ESC aquele que possui maior Ma e Ksat. Da mesma forma, diferencia-se dos demais, pois possui menor Ds.

Na camada inferior (0,10 – 0,20 m), onde foi possível observar avaliar o ESC, percebe-se o mesmo comportamento obtido na semeadura, com elevada Ma e Ksat ainda na camada de 0,10-0,20 m, reduzindo-se severamente na camada 0,20-0,30 m, essa que foi pouco afetada pela haste do escarificador.

Tabela 2. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado 55 dias após a semeadura. ANO I. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	Camada (cm)	Ds	PT	Mi	Ma	Ksat					
CONV	0 - 5	0,83	a	0,60	ns	0,41	ns	0,19	b	4,27	c
ESC		0,68	b	0,66		0,37		0,29	a	61,56	a
CAM		0,74	b	0,65		0,39		0,25	ab	30,41	b
CV(%)		4,07		6,11		8,78		17,63		35,15	
CONV	5 - 10	0,88	a	0,59	ns	0,46	ns	0,13	b	1,12	b
ESC		0,76	b	0,62		0,39		0,23	a	23,78	a
CAM		0,83	a	0,60		0,44		0,15	ab	4,58	b
CV(%)		8,97		8,53		7,55		22,57		29,86	
ESC	10 – 20	0,81		0,57		0,41		0,16		13,50	
ESC	20 – 30	0,85		0,57		0,48		0,09		0,48	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns = não significativo para o teste de Tukey ($p < 0,05$); CV = coeficiente de variação. CONV = preparo e semeadura convencional; ESC = escarificação e semeadura convencional; CAM = preparo convencional e semeadura em camalhões. Ds = Densidade do solo (g cm^{-3}); PT = Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Mi = Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ma = Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ksat = Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}).

Após as intensas chuvas ocorridas nos meses de dezembro de 2014 e janeiro de 2015, a cultura da soja não sofreu mais inundações. Pelo contrário, houve momentos em que a não ocorrência de precipitações em curtos períodos de tempo provocaram pequenas estiagens, o que pode ter potencializado os ciclos de umedecimento e secagem nas camadas superficiais do solo e, por consequência, evitando a reconsolidação do solo. Dessa forma, na última coleta, após a colheita da

cultura da soja, nas camadas mais superficiais avaliadas (0,00 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m), a Ma e a Ksat permaneceram elevadas, especialmente para o ESC, que possui pelo menos 2,3 e 5,5 vezes maior Ksat nas camadas 0,00 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m, respectivamente, quando comparado aos demais sistemas de manejo.

Na semeadura, na camada de 0,10 – 0,20 m (Tabela 3), mesmo que a Ma do sistema de manejo CAM tenha sido igual estatisticamente ao ESC, a Ksat foi menor, assemelhando-se ao sistema CONV, com valores próximos a zero. Nesta última coleta, o ESC diferencia-se dos demais sistemas de manejo pelos maiores valores de Ma e Ksat, sendo a Ksat pelo menos 4,7 vezes maior do que os demais sistemas.

Neste solo, mesmo passados praticamente 5 meses das operações de preparo, o efeito da escarificação parece ser persistente para auxiliar na manutenção de condições básicas de aeração do solo para o desenvolvimento da cultura de interesse.

Tabela 3. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado 140 dias após a semeadura. ANO I. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	Camada (cm)	Ds		PT		Mi		Ma		Ksat	
CONV	0 - 5	0,77	ns	0,69	ns	0,52	ns	0,18	ns	13,51	b
ESC		0,85		0,67		0,50		0,17		31,22	a
CAM		0,81		0,68		0,51		0,17		10,87	b
CV(%)		7,28		2,95		5,45		11,84		30,43	
CONV	5 - 10	0,91	ns	0,65	ns	0,53	ns	0,11	b	15,76	b
ESC		0,82		0,69		0,49		0,19	a	89,66	a
CAM		0,92		0,59		0,50		0,09	b	15,35	b
CV(%)		7,13		7,68		9,81		29,78		31,80	
CONV	10 - 20	0,86	ns	0,68	ns	0,57	ns	0,11	b	4,97	b
ESC		0,80		0,69		0,54		0,16	a	23,16	a
CAM		0,90		0,67		0,58		0,10	b	2,60	b
CV(%)		8,54		3,12		7,85		28,98		63,94	
CONV	20 - 30	0,89	ns	0,67	ns	0,56	ns	0,11	ns	4,69	ns
ESC		0,89		0,69		0,57		0,12		8,49	
CAM		0,90		0,63		0,55		0,08		6,36	
CV(%)		4,47		6,82		6,96		16,83		46,64	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ^{ns} = não significativo para o teste de Tukey ($p < 0,05$); CV = coeficiente de variação. CONV = preparo e semeadura convencional; ESC = escarificação e semeadura convencional; CAM = preparo convencional e semeadura em camalhões. Ds = Densidade do solo (g cm^{-3}); PT =

Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); M_i = Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); M_a = Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); K_{sat} = Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}).

Apesar de pertencerem à mesma classe de classificação, os dois Gleissolos avaliados possuem diferenças quanto à sua textura. No segundo ano agrícola (ANO II), mesmo que o sistema ESC+CAM tenha sido adicionado nas avaliações com o intuito potencializar os efeitos da escarificação com a construção de microcamalhões na produtividade das culturas avaliadas, a M_i não se diferenciou em nenhum manejo aplicado, independente da época de avaliação, assim como observado no ANO I; porém, nas propriedades D_s e PT ocorreram algumas diferenças estatísticas pontuais.

Na camada superficial (0,00 - 0,05 m), os sistemas de manejo proporcionaram diferença estatística apenas para a PT (Tabela 4). As demais propriedades tiveram comportamento semelhante ao observado no ANO I, onde a D_s foi menor e a M_a e K_{sat} maior do que nas camadas inferiores. Mesmo que a haste do escarificador também tenha atingido uma profundidade efetiva de 30 cm, neste solo, as diferenças nas propriedades físicas mais marcantes entre sistemas de manejo concentram-se apenas na camada 0,05 - 0,10 m. Nessa camada, a D_s foi maior nos sistemas CONV e CAM+ESC e menor no ESC e no CAM. Além disso, a M_a foi superior nos sistemas CAM, ESC e CAM+ESC, porém estes últimos não se diferenciam de CONV. Apesar de a D_s e a M_a serem contrastantes com o que é esperado de um tratamento escarificado (ESC+CAM), ou seja, D_s mais baixa e M_a mais alta, a K_{sat} foi maior nos dois sistemas submetidos à escarificação. Nas demais camadas (0,10 – 0,30 m), não houve diferenças significativas em nenhuma das propriedades físicas avaliadas.

Alterações na forma de utilização e a aplicação de distintas práticas agrícolas podem modificar significativamente a estrutura do solo (REICHERT et al., 2007). Muitas são as propriedades físicas do solo sensíveis ao manejo e que influenciam o crescimento vegetal e as demais funções do solo no ambiente (REICHERT et al., 2003).

Tabela 4. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado no momento da semeadura. ANO II. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	Camada (cm)	Ds		PT		Mi		Ma		Ksat	
CONV	0 - 5	1,35	ns	0,50	b	0,38	ns	0,12	ns	17,89	ns
ESC		1,22		0,59	a	0,40		0,19		18,28	
CAM		1,23		0,59	a	0,40		0,18		15,90	
CAM+ESC		1,27		0,55	ab	0,41		0,15		20,75	
CV(%)		8,43		6,01		9,06		29,17		22,18	
CONV	5 - 10	1,57	a	0,45	ns	0,36	ns	0,09	b	4,07	b
ESC		1,36	b	0,52		0,38		0,15	ab	15,10	a
CAM		1,32	b	0,54		0,37		0,17	a	3,48	b
CAM+ESC		1,53	a	0,46		0,36		0,10	ab	12,71	a
CV(%)		8,00		10,78		9,33		27,17		30,17	
CONV	10 - 20	1,51	ns	0,46	ns	0,37	ns	0,08	ns	3,40	ns
ESC		1,48		0,46		0,36		0,10		3,36	
CAM		1,42		0,48		0,39		0,09		3,72	
CAM+ESC		1,49		0,48		0,38		0,10		3,55	
CV(%)		12,95		16,07		19,03		17,92		11,12	
CONV	20 - 30	1,44	ns	0,46	ns	0,38	ns	0,09	ns	4,47	ns
ESC		1,50		0,49		0,39		0,09		4,46	
CAM		1,43		0,49		0,37		0,12		4,78	
CAM+ESC		1,46		0,49		0,39		0,11		3,81	
CV(%)		14,09		16,80		19,21		23,61		31,53	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns = não significativo para o teste de Tukey ($p < 0,05$); CV = coeficiente de variação. CONV = preparo e semeadura convencional; ESC = escarificação e semeadura convencional; CAM = preparo convencional e semeadura em camalhões; ESC+CAM= escarificação e semeadura em camalhões. Ds = Densidade do solo (g cm^{-3}); PT = Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Mi = Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ma = Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ksat = Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}).

Da mesma forma que no ANO I, os períodos que sucederam a semeadura foram de ocorrência de grandes precipitações pluviais (497 mm) (Figura 14), que acumuladas propiciaram as maiores cheias dos rios da fronteira oeste do Rio Grande do Sul em 55 anos (CLIMATEMPO, 2016). Devido às características da área de estudo do ANO II (grande distância de rios com leito maior), não ocorreram inundações e submersão das plantas nos diferentes sistemas de manejo.

Aos 45 dias após a semeadura, a Ds foi menor e a Ma e a Ksat foram maiores na camada 0,00 – 0,05 m do que nas camadas subsuperficiais, como observado na primeira coleta (semeadura), porém não houve diferença para essas propriedades

entre sistemas de manejo (Tabela 5). Na segunda camada (0,05 - 0,10 m), o sistema ESC+CAM diferiu dos demais sistemas, com menor Ds e maior Ksat, para este tratamento. A Ma foi superior no CAM, mas não diferiu do CAM+ESC, que por sua vez não diferiu dos sistemas CONV e ESC. Esse comportamento parece inconsistente, uma vez que o ESC, no momento da sementeira, era superior em Ma e Ksat e, agora compara-se aos demais sistemas que são menos intensivos em termos de mobilização do solo.

Aos 45 dias após a sementeira o sistema ESC+CAM proporcionou maiores Ma e Ksat na camada 0,10-0,20 m em relação aos demais sistemas, mesmo com valores mais inferiores em detrimento das camadas superiores, diferentemente da primeira avaliação. Na camada mais profunda (0,20 – 0,30 m), assim como na sementeira e no ANO I, não foram observadas diferenças nas propriedades físicas entre os sistemas de manejo. Apenas, verifica-se um sutil aumento na Ds ($1,58 \text{ g.cm}^{-3}$) e redução na Ma ($0,09 \text{ cm.cm}^{-3}$) do solo com o aumento da profundidade.

Tabela 5. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado 45 dias após a sementeira. ANO II. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	Camada (cm)	DS	PT	Mi	Ma	Ksat					
CONV	0 - 5	1,21	ns	0,56	ns	0,42	ns	0,15	ns	10,45	ns
ESC		1,23		0,55		0,42		0,13		15,27	
CAM		1,25		0,55		0,41		0,14		12,21	
CAM+ESC		1,20		0,58		0,39		0,19		13,35	
CV(%)		5,76		4,80		6,19		24,53		18,46	
CONV	5 - 10	1,44	a	0,48	ns	0,38	ns	0,11	b	4,46	b
ESC		1,41	a	0,50		0,38		0,11	b	6,95	b
CAM		1,43	a	0,53		0,38		0,15	a	5,44	b
CAM+ESC		1,31	b	0,53		0,40		0,13	ab	12,10	a
CV(%)		2,73		7,52		7,94		12,81		17,89	
CONV	10 - 20	1,57	ns	0,43	ns	0,35	ns	0,08	b	1,57	b
ESC		1,59		0,42		0,35		0,07	b	1,53	b
CAM		1,53		0,45		0,37		0,08	b	2,47	ab
CAM+ESC		1,52		0,49		0,36		0,13	a	3,79	a
CV(%)		5,37		7,03		7,30		15,59		32,36	
CONV	20 - 30	1,58	ns	0,42	ns	0,33	ns	0,10	ns	2,00	ns
ESC		1,58		0,43		0,33		0,09		3,69	
CAM		1,55		0,45		0,36		0,09		1,75	
CAM+ESC		1,60		0,42		0,34		0,09		2,22	
CV(%)		4,82		9,76		12,16		17,55		51,30	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ^{ns} = não significativo para o teste de Tukey ($p < 0,05$); CV = coeficiente de variação. CONV = preparo e semeadura convencional; ESC = escarificação e semeadura convencional; CAM = preparo convencional e semeadura em camalhões; ESC+CAM= escarificação e semeadura em camalhões. Ds = Densidade do solo (g cm^{-3}); PT = Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Mi = Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ma = Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ksat = Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}).

No ano agrícola 2015/2016 (ANO II), diferentemente do ano anterior, devido ao acumulado de precipitações, foram raras as vezes que o solo não esteve próximo da saturação, o que pode ter favorecido uma reacomodação das partículas de solo. Assim, mesmo que permaneçam ocorrendo diferenças em propriedades do solo como a Ma e a Ksat, essas diferenças não são tão marcantes como aquelas verificadas nas coletas anteriores. As camadas 0,00 – 0,05 m e 0,20 – 0,30 m da semeadura a colheita, não foram influenciadas pelas diferentes práticas de manejo. A Ds, a Ma e a Ksat aumentam, diminuem e diminuem, respectivamente, com o aumento da profundidade. Nas demais camadas, os sistemas ESC e ESC+CAM auxiliam na manutenção da melhoria da estrutura do solo, seja pela redução da Ds, pelo aumento da Ma ou por maiores valores de Ksat (Tabela 6).

Estudos realizados em solos de várzea evidenciam, de modo geral, que o uso do solo ocasiona aumento na densidade e redução na porosidade total e macroporosidade, principalmente em subsuperfície (NUNES et al., 2002; PAULETTO et al., 2005; LIMA et al., 2008, BAMBERG et al., 2009).

No presente estudo, por meio das propriedades até agora mencionadas (Ds, Ma e Ksat), nenhuma das áreas avaliadas teve a presença marcante de uma camada de solo compactada, principalmente entre os 0,05 m e 0,20 m causada pelas operações repetidas de gradagem e intenso tráfego de máquinas utilizado nas áreas de arroz irrigado (BAMBERG et al., 2009; MUNARETO et al., 2010; MENTGES et al., 2013; MULLER, 2015). Neste estudo, verifica-se também que, ao contrário do esperado, as diferenças na Ksat não são coerentes com as mudanças na porosidade, ou seja, quanto maior a PT e a Ma, maior será a Ksat (MESQUITA & MORAES, 2004; PREVEDELLO et al., 2013). Esse comportamento não acontece sempre e o aumento da Ksat está bastante relacionado ao sistema de manejo (ESC ou ESC+CAM), que pode não ter alterado a Ma e a PT o suficiente para proporcionar diferenças estatísticas mais marcantes. É possível que o aumento da Ksat nestes sistemas esteja

relacionado à criação de pontos de ruptura, que formam fluxos de água preferencial, sem alterar demasiadamente as propriedades Ma e PT.

A escarificação esporádica do solo tem se apresentado como uma alternativa viável, principalmente em solos sob plantio direto em áreas de coxilha (CAMARA & KLEIN, 2005; VIEIRA & KLEIN, 2007; COLLARES et al., 2008). A partir desta operação, há uma redução ou alívio dos efeitos da compactação nas propriedades do solo. Em muitos casos é possível conciliar a esta técnica de manejo, a manutenção de grandes quantidades de palha na superfície, contribuindo na redução das perdas de solo por erosão (CAMARA & KLEIN, 2005), o que pode ser interessante na sua utilização em áreas de várzea em rotação com culturas hibernais uma vez que a escarificação tende a gerar redução nos valores de densidade e aumento na macroporosidade e a porosidade total (MACHADO et al., 1996; KLEIN et al., 2008, REICHERT et al., 2009).

Como verificado neste estudo, a relação positiva entre a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo saturado (MESQUITA & MORAES, 2004) foi confirmada. No entanto, o estudo de Mentges (2010), em Gleissolo Háplico, proporcionou redução nos valores de macroporosidade face à ação da compactação do solo, mas esta não foi suficiente para gerar diferenças na condutividade hidráulica deste solo. Apesar de valores bastante discrepantes de Ksat, o autor menciona que a grande variação decorreu em um elevado coeficiente de variação (CV = 89,19%), comumente encontrados nesta propriedade física.

Melhorias hídricas e mecânicas são observadas em solos escarificados, com aumento na infiltração e na condutividade hidráulica do solo saturado (CAMARA & KLEIN, 2005b; VIEIRA & KLEIN, 2007) e redução na resistência à penetração (ABREU et al., 2004; CAMARA & KLEIN, 2005; COLLARES et al., 2008) em comparação a solos não escarificados. Além disso, a ocorrência do “pé-de-grade” é facilmente encontrada em solos cultivados no sistema convencional, no qual várias operações são realizadas no preparo do solo. No entanto, o estudo da ocorrência de camadas compactadas em solos cultivados com arroz irrigado e o efeito da escarificação é restrito, sendo, de grande importância para a validação dessa técnica de manejo do solo e da água e áreas de várzea onde pretende-se adotar o sistema de rotação de culturas.

Tabela 6. Densidade do solo, porosidades e condutividade hidráulica do solo saturado 140 dias após a semeadura. ANO II. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	Camada (cm)	Ds	PT	Ma	Mi	Ksat					
CONV	0 - 5	1,10	ns	0,49	ns	0,14	ns	0,36	ns	11,27	ns
ESC		1,18		0,48		0,14		0,36		12,44	
CAM		1,18		0,48		0,17		0,31		11,39	
ESC+CAM		1,16		0,48		0,17		0,32		17,47	
CV(%)		9,19		8,04		17,68		16,54		24,99	
CONV	5 - 10	1,36	a	0,43	ns	0,09	b	0,34	ns	5,51	bc
ESC		1,23	b	0,48		0,11	ab	0,37		19,56	a
CAM		1,35	a	0,51		0,13	ab	0,37		3,23	c
ESC+CAM		1,19	b	0,54		0,16	a	0,38		8,89	b
CV(%)		6,55		16,16		29,38		20,30		19,46	
CONV	10 - 20	1,42	ns	0,39	b	0,06	b	0,33	ns	2,10	b
ESC		1,32		0,42	a	0,12	a	0,31		6,05	a
CAM		1,33		0,40	ab	0,07	ab	0,33		2,04	b
ESC+CAM		1,39		0,42	a	0,08	ab	0,33		2,97	b
CV(%)		7,68		3,29		32,05		8,48		40,16	
CONV	20 - 30	1,44	ns	0,40	ns	0,07	ns	0,32	ns	1,95	ns
ESC		1,42		0,43		0,09		0,34		2,57	
CAM		1,47		0,40		0,06		0,34		0,78	
ESC+CAM		1,54		0,38		0,07		0,31		1,04	
CV(%)		6,28		6,45		31,55		9,01		56,96	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns = não significativo para o teste de Tukey ($p < 0,05$); CV = coeficiente de variação. CONV = preparo e semeadura convencional; ESC = escarificação e semeadura convencional; CAM = preparo convencional e semeadura em camalhões; ESC+CAM= escarificação e semeadura em camalhões. Ds = Densidade do solo (g cm^{-3}); PT = Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Mi = Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ma = Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ksat = Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}).

6.3. Taxa de infiltração de água no solo

A taxa de infiltração de água estável (TIE) foi influenciada pelos manejos escarificados na estrutura do solo, independente do ano e local avaliado, assim como observado na Ksat e na Ma.

No ANO I, as alterações promovidas pela escarificação foram percebidas em todos os momentos do ciclo da cultura (Tabela 7). A taxa de infiltração (mm h^{-1}) no ESC foi de 2,8 a 5,9 vezes maiores do que nos demais sistemas de manejo. Porém, mesmo que a TIE seja muito elevada no ESC, ao longo de todo o ciclo da cultura, os

sistemas de manejo CONV e CAM tiveram TIE alta (15 – 30 mm h⁻¹) ou muito alta (>30 mm h⁻¹) de acordo com a classificação proposta por Bernardo et al. (2006).

Tabela 7. Taxa de infiltração de água (mm.h⁻¹) em Gleissolo Melânico sob diferentes formas de preparo e semeadura. ANO I. Alegrete, RS.

	0 DAP		55 DAP		140 DAP	
CONV	38,2	b	24,2	b	40,7	b
ESC	113,2	a	136,2	a	114,4	a
CAM	34,5	b	29,5	b	41,8	b
CV(%)	26,90%		25,28%		14,36%	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); CV = coeficiente de variação. CONV = preparo e semeadura convencional; ESC = escarificação e semeadura convencional; CAM = preparo convencional e semeadura em camalhões.

No segundo ano (ANO II), apesar das diferenças existentes entre os solos (textura e histórico de utilização), as modificações provocadas pelos sistemas escarificados sobre a TIE são evidentes (Tabela 8). A taxa de infiltração (mm h⁻¹), no momento da semeadura, no ESC não diferiu estatisticamente do ESC+CAM, que por sua vez foram maiores do que os sistemas CONV e CAM. Nas demais épocas de avaliação (45 e 140 dias após a semeadura), o ESC teve TIE superior ao ESC+CAM, esse que permanece maior do que os demais sistemas que não envolvem a escarificação mecânica. A escarificação proporciona valores de TIE até 12 vezes maiores do que o sistema convencional de manejo.

Tabela 8. Taxa de infiltração de água (mm.h⁻¹) em Gleissolo Háplico sob diferentes formas de preparo e semeadura. ANO II. Alegrete, RS.

	0DAP		45DAP		150DAP	
CONV	1,7	b	3,3	c	1,0	c
ESC	17,9	a	15,4	a	12,9	a
CAM	3,2	b	3,8	c	2,1	c
ESC + CAM	14,5	a	8,5	b	10,0	b
CV%	47,3		54,58		29,75	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); CV = coeficiente de variação. CONV = preparo e semeadura convencional; ESC = escarificação e semeadura convencional; CAM = preparo convencional e semeadura em camalhões; ESC+CAM= escarificação e semeadura em camalhões.

Em todos os momentos avaliados, a TIE foi considerada baixa (< 5 mm h⁻¹) no CONV e no CAM, de acordo com a classificação proposta por Bernardo et al.

(2006). Nos sistemas de manejo que envolvem escarificação, a TIE manteve-se como média (5 a 15 mm h⁻¹) ao longo de todo o ciclo de cultivo estival.

A duração dos efeitos da escarificação mecânica depende da propriedade do solo avaliada. Assim como neste estudo, Drescher et al. (2016) observou que propriedades como Ksat e TIE são as mais sensíveis para detectar a duração das alterações na estrutura do solo provocadas pela escarificação e permitem detectar alteração no transporte de água no solo, para períodos mais prolongados, enquanto a Ds e a PT permitem detectar alteração na ocupação do volume de solo por sólidos (Ds) ou vazios (PT), para períodos de até uma safra agrícola após escarificação. Os autores afirmam que variáveis como Ksat e TIE estão diretamente relacionadas à geometria do espaço poroso do solo e, desse modo, pequenas mudanças no raio dos poros por alteração estrutural ou reconsolidação mudam pouco a Ds e a fração de classes de poros, mas podem mudar muito a Ksat e a TIE o que confere maior sensibilidade a essas variáveis em resposta às alterações promovidas pelo manejo do solo.

Além disso, ao longo do tempo, por haver maior ocupação do volume de solo por raízes após escarificação (REICHERT et al., 2009; NUNES et al., 2015), mais bioporos podem permanecer no solo mesmo que haja reconsolidação de sua estrutura, pois a ausência de revolvimento favorece a estabilização de poros. Dessa forma, para conhecer a duração da descompactação mecânica do solo, em condições de campo, a avaliação de propriedades relacionadas ao processo de transporte de água mostra-se mais adequada, uma vez que apresenta o efeito da escarificação mecânica por mais tempo (DRESCHER et al., 2016).

6.4. Resistência à penetração mecânica do solo

A melhoria das condições físicas dos solos não é proveniente apenas de práticas mecânicas de preparo do solo. Porém, as práticas mecânicas, quando corretamente empregadas podem ser importantes em propiciar condições adequadas para o estabelecimento das culturas (MACHADO et al., 1996). Uma destas é a escarificação, que tem por objetivo reduzir a resistência à penetração de raízes, aumentar a permeabilidade e reduzir o encharcamento em terrenos planos (DALLA ROSA, 1981).

Como o solo sofreu um processo de acomodação desde o preparo até o ciclo de desenvolvimento das culturas estivais, após as intensas precipitações, a RP é um indicativo do grau de compactação a que as plantas serão submetidas durante o restante do ciclo. A duração dos efeitos da escarificação pode ser intensificada ou retardada, dependentemente da intensidade da manifestação de fatores controladores da reconsolidação e da resiliência do solo, como precipitações, ciclos de umedecimento e secagem, e espécies cultivadas, particularmente quando ocorrem imediatamente após uma determinada escarificação (DRESCHER et al., 2016).

Durante o ANO I, foi possível verificar claramente a RP mais elevada na camada de 0,10 a 0,20 m, mesmo que outras propriedades não indiquem restrições tão pronunciadas (Figura 15). A existência de uma camada compactada subsuperficialmente (pé-de-grade) ocorre devido ao intenso tráfego e ao manejo mecânico excessivo do solo em condições de umidade inadequada nestas áreas (PINTO et al., 2004) e interfere em outras propriedades, principalmente nas propriedades hidráulicas (Tabelas 1, 2 e 7), nestes solos. Diferentemente do sistema de manejo ESC, no CAM não foram observadas mudanças estruturais a partir dos 0,10 m de profundidade. Isso já era esperado, uma vez que o processo de amontoa provocado pelas aivecas da semeadora camalhoneira não atinge profundidades superiores a esta.

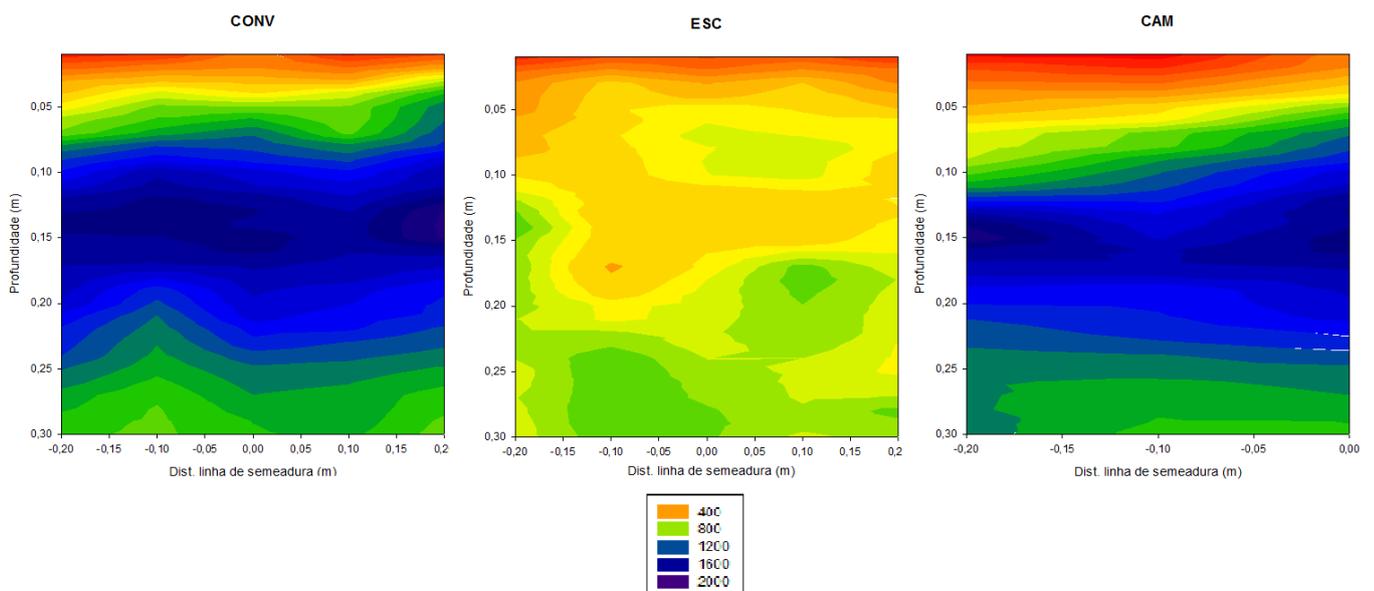


Figura 15. Resistência do solo à penetração (em kPa) medida 45 dias após as operações de preparo e semadura em Gleissolo Melânico. ANO I. Alegrete, RS.

Apesar de características de solo diferenciadas, os manejos propostos no ANO II provocaram efeitos semelhantes na RP àqueles obtidos no ANO I. Mesmo que neste solo, a presença de uma camada mais compactada evidenciada pela RP a partir de 0,10 m se estenda até 0,30 m (final das medições), é possível verificar o efeito da escarificação na redução da RP nos tratamentos onde esta operação é realizada (ESC e ESC+CAM) (Figura 16). Porém, este efeito não é tão pronunciado em profundidade como no ANO I. Isso pode acontecer devido a condição de realização da operação não ser adequada (umidade elevada). A haste do escarificador atinge profundidade próxima a 30 cm, porém seus efeitos não são evidenciados na análise de RP até esta camada, assim como não percebido em outras propriedades do solo (Tabelas 4, 5 e 6). As mudanças mais marcantes no solo são provocadas na camada 0,10 – 0,20 m e após estas camadas, são criadas apenas fissuras ao redor da haste, que não são perfeitamente indicadas pela RP.

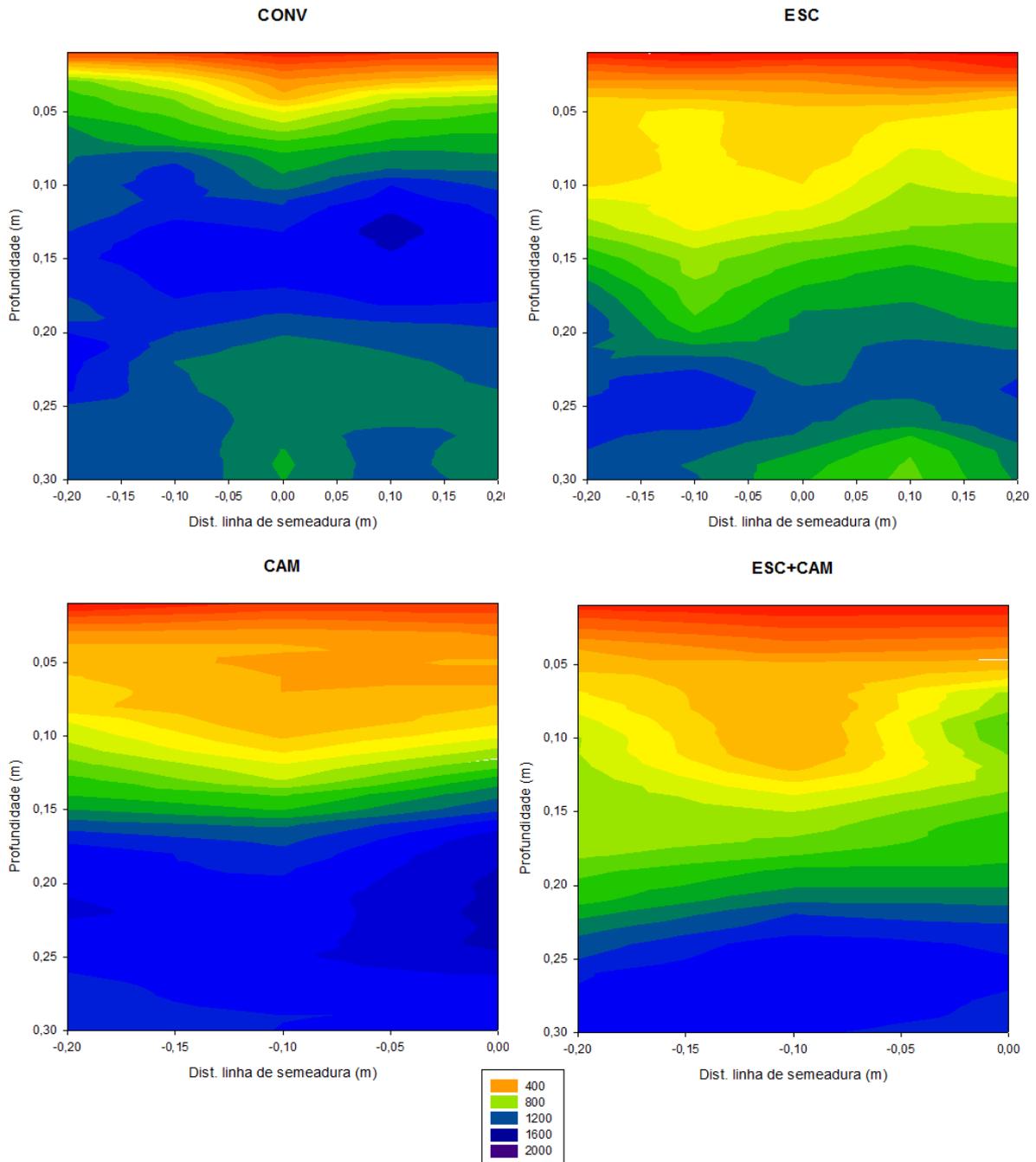


Figura 16. Resistência do solo à penetração (em kPa) medida 55 dias após as operações de preparo e semeadura em Gleissolo Háplico. ANO II. Alegrete, RS.

A compactação modifica a estrutura do solo, o que pode limitar o estabelecimento e desenvolvimento das culturas (IMHOFF, 2002). Em camadas compactadas, a densidade é elevada e a porosidade total reduzida, principalmente pela redução na macroporosidade (RICHART et al., 2005; LIMA et al., 2006; REICHERT et al., 2009b; DRESCHER et al., 2016). Por essas alterações, a resistência do solo à penetração se eleva (SILVA et al., 2000b; REICHERT et al.,

2009b), o que pode restringir o desenvolvimento radicular das culturas caso alcance valores mais elevados. Muitos trabalhos (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; TAVARES FILHO et al., 2001; LAPEN et al., 2004; SILVA et al., 2008) afirmam que o valor de resistência do solo à penetração de 2,0 MPa tem se mostrado restritivo ao desenvolvimento radicular das plantas. Neste estudo, em nenhum tratamento ou ano avaliado obteve-se valores superiores a 2 MPa. Considerando as datas avaliadas e a condição de umidade elevada na qual o solo se encontrava, a resistência à penetração apresentou, por esse motivo, baixos valores. A água atua como uma espécie de lubrificante entre as partículas do solo, pois reduz a coesão e o ângulo de atrito interno, o que reduz a resistência do solo (CUNHA et al., 2002). Pode-se inferir que, em anos onde a umidade do solo ao longo do ciclo seja baixa, os valores de RP tendem a ser mais elevados que os observados e por ventura restringirem o crescimento de plantas nos tratamentos onde a RP é elevada nos primeiros centímetros de solo.

6.5. Rugosidade superficial aleatória (RR) e desnível médio do camalhão

A rugosidade superficial do solo demonstra o efeito das deformações que compõem a superfície do solo. Esta propriedade é comumente utilizada em estudos que contemplem medidas mitigadoras da erosão superficial. Uma RR elevada indica que o solo possui muitas depressões e ondulações, que agem como barreiras e isso acaba reduzindo a velocidade da enxurrada, diminuindo assim a erosão. Essa rugosidade do solo faz com que as taxas de infiltração da água sejam maiores do que em superfícies lisas. Porém, neste estudo, a determinação da RR tem como principal objetivo o de auxiliar na percepção da manutenção das modificações impostas pelos diferentes manejos na superfície do solo ao longo do tempo.

Logo após as operações de preparo, a RR obtida no ANO I foi superior no sistema de manejo ESC, maior inclusive do que o CAM. Ambas, foram superiores ao CONV em 128 e 94% respectivamente, o que reflete uma menor mobilização do solo (Tabela 9). Após uma série de intensas precipitações após a semeadura, a RR 55 dias após a semeadura do CAM foi superior à do ESC, que por sua vez, foi superior ao CONV. Ao final do ciclo estival do ANO I, o comportamento da RR foi CAM>ESC>CONV, sendo que o CONV e o ESC tiveram aproximadamente 41 e 73%, respectivamente, da RR observada no CAM.

Quando analisamos os tratamentos de forma individual ao longo do tempo, percebemos uma clara redução da RR. Em valores absolutos, essa redução foi mais acentuada no ESC, seguida do CAM. Vale ressaltar que, somente no CAM, há garantia de que as plantas estejam posicionadas em posições mais altas. No ESC, as plantas poderão ter se desenvolvido nas depressões provocadas pelo preparo.

Tabela 9. Rugosidade superficial aleatória em Gleissolo Melânico sob diferentes formas de preparo e sementeira. ANO I. Alegrete, RS.

	0DAP		55DAP		140DAP		CV(%)
CONV	1,8	cA	1,4	cA	0,9	cB	13,2
ESC	4,1	aA	2,8	bB	1,6	bC	13,5
CAM	3,5	bA	3,3	aAB	2,2	aB	22,5
CV(%)	7,8		14,3		32,3		

(1) Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na mesma coluna, e maiúsculas, na linha, diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A RR do ANO II indicou um comportamento semelhante no que tange à acomodação do solo ao longo do ciclo, quando comparado ao ANO I, com alta RR logo após as operações de preparo e sementeira, reduzindo ao longo do ciclo (Tabela 10). Porém, neste solo, o ESC não proporcionou RR maior do que a observada no CAM e no ESC+CAM. Isso se deve a uma maior umidade durante as operações de preparo, o que conferiu uma maior friabilidade às camadas superficiais. Assim, durante a escarificação, não foram gerados tantos “torrões” de solo, que contribuem para aumentar a RR inicial (Tabela 9 - ANO I). Logo após o preparo, a RR é maior em ESC+CAM e CAM, e menor em ESC e CONV. Tal comportamento permaneceu ao longo do ciclo de cultivo estival (ANO II), apesar de haver uma clara redução da RR nos sistemas de manejo ESC, CAM e ESC+CAM, ao longo do ciclo estival. Para este solo, mesmo após 150 DAP e 685 mm de precipitação, os sistemas de manejo ESC+CAM e CAM permaneceram com RR 3,4 e 2,9 vezes maiores que no CONV.

Tabela 10. Rugosidade superficial aleatória em Gleissolo Háplico sob diferentes formas de preparo e semeadura. ANO II. Alegrete, RS.

	0 DAP		45 DAP		150 DAP		CV (%)
CONV	1,8	bA	1,9	bA	1,6	cA	11,4
ESC	2,9	bA	2,2	bAB	1,9	cB	14,1
CAM	6,7	aA	5,4	aAB	4,7	bB	15,0
ESC+CAM	7,5	aA	6,3	aAB	5,4	aB	9,8
CV (%)	18,8		14,0		9,5		

(1) Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na mesma coluna, e maiúsculas, na linha, diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

O desnível médio para verificar a permanência do manejo camalhão/sulco ao longo do ciclo de cultivo, nos sistemas onde houve a construção de camalhões (Tabela 11), indicou que, independente do solo ou do manejo apresentado, houve uma redução no desnível com o passar do tempo, o que contribuiu para uma redução do efeito proporcionado pelo camalhão na elevação do sistema radicular das culturas. Ao considerar todos os tratamentos com camalhão (ANO I e ANO II), o desnível médio foi de 16,3 cm na semeadura para 9,3 cm após o ciclo de culturas estivais.

Essa redução foi de aproximadamente 42%. Tal redução pode ser benéfica, uma vez que facilita as operações de preparo para o cultivo do arroz no período estival subsequente ou limitante, tendo em vista a manutenção de cultivos de sequeiros nestes mesmos locais ao longo dos anos.

Tabela 11. Desnível médio (cm) dos tratamentos com camalhão em diferentes momentos ao longo do ciclo das culturas. ANOS I e II. Alegrete, RS.

		0 DAP		55 DAP		140 DAP		CV (%)
ANO I	ESC+CAM	12,0	a	8,4	b	5,8	c	15,9
		0 DAP		45 DAP		150 DAP		CV (%)
ANO II	CAM	17,3	a	12,8	b	11,1	b	8,1
	ESC+CAM	19,6	a	15,5	b	12,6	c	5,9

(1) Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na linha, diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

DAP = dias após o preparo

6.6. Parâmetros das culturas

6.6.1. SOJA

O índice de área foliar e a população de plantas, nas duas cultivares mais semeadas em área de várzea no estado do Rio Grande do Sul (Informação pessoal –

Levantamento IRGA), indicou que, em nenhuma das cultivares, o efeito do sistema de manejo foi significativo tanto para a porcentagem de plantas estabelecidas quanto para o IAF máximo (Tabela 12). O IAF de soja, necessário para garantir rendimentos elevados, varia entre 3,5 a 4,5, ou seja, uma relação aproximada de 4:1 (GASSEN, 2002). No ANO I, o IAF variou de 2,6 a 5,8 $m^2 m^{-2}$ e, apenas o tratamento ESC proporcionou valores mais altos que 4, impulsionado por uma maior população de plantas estabelecidas quando comparado aos demais tratamentos.

Tabela 12. Índice de área foliar e população de plantas estabelecidas de soja semeada em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2014/2015. Alegrete, RS.

	pl m^{-1}	% pl. estab.		IAF Máximo ($m^2 m^{-2}$)	
PC	6,75	56,3	b	2,6	b
CAM	7,50	62,5	b	3,4	b
ESC	9,25	77,1	a	5,8	a
CV(%)	15,51			15,5	

(1) Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na mesma coluna, diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

No ANO II, independente da cultivar avaliada, não houveram diferenças significativas, tanto para o percentual de plantas estabelecidas, quanto para o IAF máximo (Tabela 13). Apesar de diferenças de até 36% no IAF Máximo, todos os tratamentos tiveram valores inferiores ao mínimo definido para garantir boas produtividades.

Tabela 13. Índice de área foliar e população de plantas estabelecidas de cultivares de soja semeadas em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2015/2016. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	BMX PONTA RSF 7166 IPRO				
	pl m^{-1}	% pl. estabelecidas		IAF Máximo ($m^2 m^{-2}$)	
CONV	6,75	56,3	ns	3,1	ns
ESC	8,00	66,7		2,5	
CAM	6,50	54,2		2,8	
ESC+CAM	7,00	58,3		3,4	
CV(%)	22,42			15,76	
	Tec IRGA 6070				
CONV	7,00	58,3	ns	3,2	ns
ESC	7,25	60,4		2,9	
CAM	6,00	50,0		2,8	
ESC+CAM	7,75	64,6		3,0	
CV(%)	31,23			13,22	

*ns = não diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Valores que variam de 50 (ANO II) até 77,1% (ANO I) de plantas estabelecidas foram obtidos, o que resultam em populações de plantas que variam de 120 a 185 mil pl ha⁻¹. Tais populações são inferiores ao mínimo indicado para estas cultivares em condições de bom desenvolvimento que é de 220 mil pl ha⁻¹. Esses resultados indicam que para situações onde após a semeadura, a germinação e o desenvolvimento inicial possuam risco de alagamento ou saturação do solo prolongada (previsão climática), deve-se considerar o aumento na densidade de semeadura.

Para a avaliação do índice de clorofila na folha, não foram encontradas diferenças significativas nas medidas realizadas, tanto no ANO I (Tabela 14), quanto no ANO II (Tabela 15). Porém, no ANO I, os valores obtidos foram maiores do que aqueles obtidos no ANO II. Isso reflete, melhores condições no desenvolvimento de plantas, o que é traduzido nos dados de produtividade da cultura, descritos a seguir (Tabela 16).

Tabela 14. Teor de clorofila na folha de soja em área de várzea submetido a diferentes manejos do solo – Safra 2014/2015 – Cultivar BMX Ponta. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	Índice de clorofila
CONV	45,1 ns
CAM	43,4
ESC	42,8
CV (%)	3,4

(1) Médias seguidas por letras distintas diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 15. Teor de clorofila na folha de cultivares de soja semeadas em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2015/2016. Alegrete, RS.

Cultivares	Sistema de manejo				CV(%)
	NS 4823	FPS Solimões	TEC IRGA 6070	BMX PONTA	
	Índice de Clorofila				
CONV	40,4	38,9	37,8	38,1	a 4,45
ESC	39,8 A	37,1 AB	36,1 B	35,2	bB 4,22
CAM	41,3 A	37,7 AB	35,5 B	38,5	aB 6,36
ESC+CAM	41,3 A	38,8 B	36,3 C	36,6	abBC 2,88
CV(%)	4,48	4,25	6,46	2,71	

(1) Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na mesma coluna, e maiúsculas, na linha, diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

No primeiro ano agrícola (ANO I), o rendimento da cultura da soja foi próximo à média do estado do RS, que é de 2900 kg ha⁻¹. O ESC superou os demais sistemas de manejo em mais de 600 kg ha⁻¹ (Tabela 16) e diferenciou-se estatisticamente dos demais. Tal aumento na produtividade é oriundo de um conjunto de fatores que decorrem de melhores condições físicas do solo neste manejo (Tabelas 1, 2, 3 e Figura 15). Além disso, o processo de escarificação, ao aumentar a taxa de infiltração (Tabela 7), possivelmente permitiu maior recarga de água no solo em precipitações pluviais com intensidades elevadas, porém volumes reduzidos (meses fevereiro e março – Figura 13). Com isso, infere-se que há mais água disponível ao desenvolvimento da planta.

Tabela 16. Rendimento de soja em área de várzea submetido a diferentes manejos do solo – Safra 2014/2015 – Cultivar BMX Ponta. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	kg ha⁻¹	
CONV	2667	B
CAM	2674	B
ESC	3290	A
CV%	8,86	

(1) Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na mesma coluna, diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

No ano agrícola 2015/2016 (ANO II), a média geral de produtividade foi de 752 kg ha⁻¹, valor muito aquém da média estadual estimada pela EMATER-RS, que foi de 2998 kg ha⁻¹. Em um cenário com custos de produção cada vez mais elevados, produtividades como estas são incompatíveis e inviabilizam economicamente a atividade em anos atípicos como este. Apesar de baixos valores de produtividades, houve diferenças estatísticas significativas tanto para as operações de preparo e semeadura, quanto para o uso de cultivares de diferentes grupos de maturação.

Em termos gerais, as produtividades obtidas nos sistemas ESC+CAM, CAM e ESC, pouco se diferenciaram entre si, porém, foram geralmente superiores ao CONV (Tabela 17). Apesar de valores absolutos baixos, os sistemas que envolvem algum tipo de preparo mais aprimorado (escarificação ou camalhão) superaram em produtividade o CONV, de 21 a 89%, dependendo da cultivar escolhida.

Quando se analisam os diferentes GM, percebe-se um efeito muito mais evidente da cultivar utilizada e sua resposta produtiva do que uma tendência a se relacionar produtividade x ciclo. Por isso, os ensaios de cultivares em rede seguem

sendo uma excelente ferramenta para a escolha de cultivares mais aptas a determinadas regiões e condições de cultivo.

Tabela 17. Rendimento de cultivares de soja em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2015/2016. Alegrete, RS.

Cultivares	NS 4823	FPS Solimões	TEC IRGA 6070	BMX PONTA	CV (%)
Sistema de manejo	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	
CONV	404,0 bB	957,7 bA	553,3 bB	530 bB	15,8
ESC	598,7 abB	1160,2 aA	761,8 aB	740,5 abB	10,7
CAM	706,7 aA	939,8 abA	806,3 aA	701,8 abA	17,3
ESC+CAM	764,2 aB	989,2 abA	666,9 abB	764,8 aB	7,7
CV (%)	21,0	8,9	12,4	14,3	

(1) Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na mesma coluna, e maiúsculas, na linha, diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

6.6.2. MILHO

A cultura do milho é sensível a estresses, tanto por excesso quanto por falta de água. A escolha da área onde será realizada a rotação com o arroz irrigado é um fator importante para o sucesso da rotação (EMBRAPA, 2013). Apesar da textura franco arenosa do solo, os baixos valores de condutividade hidráulica aliados a uma baixa declividade, podem ter dificultado a retirada de água do perfil tanto via infiltração quanto via escoamento superficial.

A população de plantas de milho almejadas no presente estudo foi de 60.000 pl ha⁻¹. Contudo, as elevadas precipitações no mês de dezembro de 2015 contribuíram para uma redução no estabelecimento da cultura (Tabela 18). Neste mês, nas fases iniciais da cultura o solo ficou mais de 15 dias saturado. Isso prejudicou não somente a germinação, como o desenvolvimento inicial das plantas. Dessa forma, os sistemas de manejo responderam de maneira diferenciada a essa situação adversa, sendo que os sistemas ESC, CAM e ESC+CAM diferiram significativamente do CONV.

Tabela 18. População de plantas estabelecidas de milho, para uma população idealizada de 60.000 pl ha⁻¹ em várzea sob diferentes manejos solo. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	População de plantas	
	(%)	(pl ha ⁻¹)
CONV	19,67 b	11800
ESC	32,98 a	19788
CAM	35,03 a	21018
ESC+CAM	34,50 a	20700
CV (%)	12,11	

Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna, diferem significativamente para o teste de Tukey (p<0,05);

O excesso de precipitações na fase inicial do experimento foi altamente prejudicial ao desenvolvimento da cultura. Ainda nessa fase houve uma redução na população de plantas almeçadas de 65 a 80 % (Tabela 18) a qual está diretamente ligada a produtividade dos tratamentos.

As plantas que se estabeleceram nos distintos sistemas de manejo obtiveram um bom desenvolvimento, e como receberam uma adução nitrogenada igual para todos sistemas de manejo, o teor de clorofila, mesmo variando de 57, 89 a 62,65 não apresentou diferenças significativas (Tabela 19). Porém, segundo Costa et al. (2012), que estudou o índice de clorofila na folha para a cultura do milho em rotação com forrageiras, valores de 59,5 a 62,5 podem ser considerados adequados para a cultura. Diante disso, mesmo que a ferramenta estatística não tenha determinado a diferença entre os tratamentos, a nutrição mineral do tratamento CONV (principalmente de N) foi deficitária em relação aos demais sistemas de manejo, provavelmente pela condição física de solo mais adversa, em que as raízes das plantas foram submetidas.

Tabela 19. Teor de clorofila na folha da cultura do Milho cultivado em solo de Várzea no município de Alegrete RS.

Sistema de manejo	Índice de clorofila
CONV	57,89 a
ESC	62,65 a
CAM	60,48 a
ESC+CAM	60,74 a
CV (%)	7,78

Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna, diferem significativamente para o teste de Tukey (p<0,05);

Com relação à produção de grãos, os sistemas submetidos a manejos mais aprimorados do solo (ESC, CAM, ESC+CAM) não diferiram entre si, no entanto,

diferiram significativamente do CONV, o qual também apresentou o menor percentual de plantas estabelecidas e, de modo geral, apresentou os piores parâmetros durante todo o desenvolvimento da cultura. Mesmo não diferindo estatisticamente de ESC, o CAM e o ESC+CAM obtiveram os melhores estabelecimentos de plantas. Nesses sistemas foi utilizada a semeadura em micro camalhões, onde o mesmo auxilia em uma elevação da semente e do sistema radicular já no começo de seu desenvolvimento.

Como a análise estatística não evidenciou diferença de produtividade entre os tratamentos (Tabela 20), uma análise de custos (não realizada neste estudo) para realização das operações poderia ajudar a indicar o melhor sistema de manejo. Em ESC+CAM, o solo foi previamente escarificado e após ocorreu a semeadura em camalhões, sendo a escarificação uma operação onerosa pelo elevado consumo energético e demanda de tempo e condições adequadas. No CAM a semeadura direta em camalhões reduz o custo com uma operação. Se somente este fator for considerado, CAM é superior quando comparado ao ESC+CAM. Além disso, CAM apresentou a maior porcentagem de plantas estabelecidas.

Tabela 20. Rendimento de grãos em kg ha⁻¹ para a cultura do milho na safra 2015/2016 em solo de várzea submetido a diferentes manejos. Alegrete, RS.

Sistema de manejo	Produtividade
	(kg ha ⁻¹)
CONV	2294,4 b
ESC	4387,8 a
CAM	4842,0 a
ESC+CAM	4617,0 a
CV (%)	22,72

Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna, diferem significativamente para o teste de Tukey ($p < 0,05$);

Ao considerar a produção em kg/planta estabelecida, verifica-se que os sistemas CONV, ESC, CAM e ESC+CAM produziram 0,19; 0,22; 0,23 e 0,22 kg de grão para cada planta estabelecida. Isso demonstra que no sistema CONV, além de a população de plantas estabelecidas ser inferior, a produtividade obtida em cada planta também é inferior aos demais sistemas de manejo.

6.6.3. PRODUÇÃO DE FORRAGEIRAS

O uso de forrageiras hibernais na rotação de cultivos em áreas de várzea é importante, pois contribui principalmente na ciclagem de nutrientes e na manutenção do solo coberto, evitando o início do processo erosivo. Várias são as forrageiras hibernais utilizadas para este fim, porém, poucas possuem maior resistência à solos encharcados. Espécies como o azevém (*Lolium multiflorum*), o trevo branco (*Trifolium repens* L.) e o cornichão (*Lotus corniculatus* L.) são sabidamente mais resistentes a saturação do solo (MARCHEZAN et al., 1998) que espécies como aveia preta (*Avena strigosa*), centeio (*Secale cereale*), trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*), dentre outras. Porém, quando se opta pelo uso de plantas de cobertura em uma rotação de cultivos agrícolas, são utilizadas espécies de fácil implantação e com maior oferta de sementes no mercado ou de fácil obtenção na propriedade. Nestes quesitos (oferta, preço e implantação), as gramíneas aveia e azevém ultimamente têm sido insuperáveis. Além disso, a utilização de leguminosas (trevos e cornichão) em consórcio pouco contribuem para a mistura forrageira (MARCHEZAN et al., 2002), representando menos de 4% ao longo do ciclo hibernar. Isso ocorre devido ao pico de crescimento destas leguminosas ser mais primaveril do que hibernar, descaracterizando seu uso como plantas aptas a rotação uma vez que, a partir do mês de outubro, o crescimento das forrageiras deve ser cessado para a introdução dos cultivos estivais.

Nos meses de inverno, a drenagem torna-se ainda mais incerta, uma vez que há uma considerável redução da evapotranspiração associada a um período de precipitações mais frequentes. Isso explica a pouca utilização de rotação de culturas em várzea e a necessidade de se identificar manejos e espécies adaptadas a solos com baixa disponibilidade de espaço aéreo.

Os cultivos hibernais no ano de 2016 experimentaram uma condição bastante desfavorável ao seu desenvolvimento devido ao excesso de precipitações que ocorreram logo após o período de semeadura. Devido a isso, a cultura da aveia desenvolveu-se apenas nos pontos mais altos do microrelevo dos sistemas de manejo CONV e ESC ou sobre os camalhões nas áreas com este manejo (Figura 17).



Figura 17. Tratamento CAM com subparcelas da esquerda para direita de Aveia, Consórcio e Azevém.

A produtividade de matéria seca das forrageiras implantadas foi muito abaixo de produtividades facilmente obtidas em áreas de sequeiro, superiores a 6 ton ha^{-1} . Independente do sistema de manejo, a média geral de produtividade de azevém, aveia e consórcio foi de 2130, 1554 e 2251 kg ha^{-1} , respectivamente (Tabela 21). Porém, mesmo após dez meses da implantação dos manejos de solo, houveram diferenças significativas entre os mesmos para todo arranjo forrageiro avaliado. De forma geral, observa-se que o CONV foi o que menos produziu, porém não diferiu estatisticamente de ESC e CAM para o azevém e aveia e de CAM e ESC+CAM para o consórcio. Os sistemas de manejo ESC, CAM e ESC+CAM não diferiram entre si em nenhum arranjo forrageiro, comportamento esse que seguiu a tendência já descrita nas produtividades de soja e milho no período estival. Assim, qualquer forma de preparo e semeadura mais elaborada, já resulta em produtividades superiores ao CONV e esse efeito é persistente na cultura em sucessão.

Tabela 21. Produção de matéria seca de forrageiras hibernais em área de várzea submetida a diferentes manejos do solo – Safra 2015/2016. Alegrete, RS.

	Azevém			Aveia			Av+Az			CV(%)
CONV	1936,8	b	A	1474,8	b	B	1944,5	b	A	14,57
ESC	2039,2	ab	A	1480,4	ab	B	2448,2	a	A	12,12
CAM	2156,4	ab	A	1506,3	ab	B	2338,0	ab	A	7,99
ESC+CAM	2388,1	a	A	1755,9	a	B	2276,1	ab	A	10,11
CV(%)	9,03			8,14			9,55			

(1) Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na mesma coluna, e maiúsculas, na linha, diferem pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Além disso, independente do sistema de manejo, a cultura da aveia produziu menos que o azevém (- 27 %) ou o consórcio de ambas (-31%), que por sua vez não diferiram entre si em nenhuma das formas de preparo e semeadura. Pode-se ressaltar que no consórcio ocorreu o predomínio de plantas de azevém (Figura 17), que alcançaram uma germinação mais breve e um desenvolvimento inicial mais rápido. Resultados semelhantes de produtividade de MS em área de várzea foram observados por Marchezan et al. (1998) comparando diferentes distâncias entre drenos (1983 kg ha^{-1}) e Vernetti Jr et al. (2009) em anos com precipitação acima da média histórica (1775 kg ha^{-1}). Em anos onde o excesso de água no solo não é fator limitante ao desenvolvimento das culturas, a produção de gramíneas nestas áreas pode quadruplicar (VERNETTI Jr et al., 2009) atingindo produtividades superiores a 8 ton ha^{-1} .

7. CONCLUSÕES

A escarificação do solo proporciona um ambiente físico com maior drenagem, maior espaço poroso ocupado por ar e menor resistência à penetração de raízes do que os sistemas de manejo convencional e apenas com camalhão durante todo o ciclo das culturas estivais. Porém, esses efeitos são menos intensos com o tempo e concentram-se em profundidades menores do que a profundidade de trabalho da haste do escarificador.

Apesar de ocorrer uma acomodação de aproximadamente 41% no desnível crista/sulco dos tratamentos com camalhão, o seu formato permanece até o fim do ciclo das culturas estivais.

A escarificação aumenta significativamente a produtividade de soja, milho e forrageiras em solos de várzea, seja esta uma prática isolada ou associada a construção de camalhões. A construção de camalhões isolada teve efeito contrastante na produção de soja nos anos de execução deste trabalho, hora não se diferenciando do sistema convencional, hora assemelhando-se aos sistemas escarificado e escarificado com camalhão.

A hipótese de que o manejo do solo para a redução da hipóxia é mais necessário quanto menor for a duração do ciclo da soja foi refutada. Apesar de a cultivar mais precoce ser a menos produtiva, as demais não seguiram uma tendência clara relacionando ciclo da cultura com produção de grãos. Assim, parece mais sensato afirmar que resistência a hipóxia é mais influenciada pela característica genética do cultivar do que pelo seu ciclo de desenvolvimento.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os anos agrícolas 2014/2015 e 2015/2016 podem ser considerados anos “Extremos” para o cultivo de culturas de sequeiro em áreas de várzea. Nestes anos, até mesmo lavouras de arroz irrigado precisaram ser ressemeadas ou tiveram sua produtividade seriamente comprometida. Assim, apesar das diferenças obtidas, é prudente afirmar que o efeito provocado pelos manejos propostos no rendimento das culturas foi prejudicado pelo excesso de precipitações ocorridas em momentos muito importantes para o desenvolvimento das culturas, como germinação, crescimento inicial (ANOS I e II) e enchimento de grãos (ANO II).

A opção de escarificar, fazer a semeadura em camalhões ou realizar ambas as operações deve considerar as possibilidades de cada produtor (implementos disponíveis) e o objetivo alicerçado pelo mesmo em sua rotação de culturas. Além disso, mesmo que não tenha sido objetivo deste estudo, a construção de camalhões deve estar vinculada a possibilidade de maior drenagem superficial quando ocorrerem precipitações em excesso ou irrigação nestas áreas em períodos de déficit hídrico. Para isso, necessitam-se mais estudos referentes à declividade do sistema sulco/camalhão nestas áreas. Tal prática tende a possibilitar a construção de potenciais produtivos ainda não experimentados nestas áreas por culturas de sequeiro como soja e milho e garantir, de fato, uma rentabilidade maximizada para estas áreas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, maio/jun., 2004.
- ALBERTI, G. et al. **Desempenho agrônômico de milho em áreas de arroz irrigado**. . In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 8, Santa Maria: UFSM. Anais ...2013.
- ARAKI, H. Water uptake of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during exposure to O₂ deficiency and field level CO₂ concentration in the root zone. **Field Crops Res.** v. 96, p. 98–105. 2006.
- 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**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1079-1086, set./out., 2009.
- BANDINELLI, P. G. et al. Avaliação de genótipos de soja em áreas orizícolas do estado do Rio Grande do Sul (RS) – safra 2014/2015. 5p. 2015. Disponível em http://www.irga.rs.gov.br/upload/20161103152913projeto_soja_6.000_iii.pdf
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Universidade federal de Viçosa, Viçosa, MG, 8 ed. 2006, 625 p
- BEWLEY, J. D. Seed germination and dormancy. **Plant Cell.** v. 9, p.1055–1066. 1997.
- BORGES, J. R. et al. Agregação de um Gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 9, n. 4, p. 389-395, out./dez., 2003.
- BORGES, J. R. et al. Resistência à penetração de um gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **R. Bras. Agroci.**, 10:83-86, 2004.
- CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.5, p.789-796, set./out., 2005.
- CHO, J.; YAMAKAWA, T. Effects on Growth and Seed Yield of Small Seed Soybean Cultivars of Flooding Conditions in Paddy Field. **Journal of the Faculty of Agriculture**, Kyushu, v.51, n. 2, p. 189–193, 2006.
- CLARK, L.J. et al. How do roots penetrate strong soil?. **Plant and Soil**, v.255, n.1, p.93-104, 2003.

- COLLARES, G. L. et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.933-942, maio/jun., 2008.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Boletim grãos 2016**. Disponível em <www.conab.gov.br/>. Acesso em 14 out. 2016.
- COSTA, N. R., Andreotti, M., Gameiro, R. de A., Pariz, C. M., Buzetti, S., & Lopes, K. S. M. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 47(8), 1038–1047. 2012 .
- CRAWFORD, R.M.M., BRAENDLE, R. Oxygen deprivation stress in a changing environment. **J. Exp. Bot.** v. 47, p. 145–159. 1996.
- CUNHA, J. P. A. da; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 10, n. 1-4, p. 573-581, jan./dez., 2002.
- DALLA ROSA, A. D. **Práticas mecânicas e culturas na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo - solo Santo Ângelo (Latosolo Roxo Distrófico)**. Porto Alegre: UFRGS, 1981. 136 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1981.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality – Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, jun., 2004.
- 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.
- DRESCHER, M.S. et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.5, p.1713-1722, 2011.
- DREW M.C. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia. **Annul Reviews Plant Physiology Plant Molecular Biologist**, v.48, p.223-250, 1997.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Editores: dos Santos H.G. et al. - 3 ed. rev. ampl. – Brasília, 2013.

- EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja**: região Central do Brasil, 2003. Londrina, 2004. 239p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FALKENMARK, M. et al. Present and future water requirements for feeding humanity. **Food Security**, v.1, n.1, p.59-69, 2009.
- FALKER, Automação agrícola. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030)**. Porto Alegre, 2008. 33p.
- FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**. In: Lier, Q. J. van (ed.). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.
- FONTANELI, R. S. et.al. **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira** - 2. ed. - Brasília, DF : Embrapa, 2012.
- GASSEN, D. **O índice de área foliar em soja**. 2002. Disponível em: <http://agrolink.com.br/colunistas/ColunaDetalhe.aspx?CodColuna=390>; Acesso em 25/09/2016.
- GASTAL et al. **Rotação e sucessão de culturas em áreas de várzea**. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JR., A.M. Arroz irrigado no sul do Brasil. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.
- IMHOFF, S. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 104p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- JACKSON, M. B. et al. Evolution and mechanisms of plant tolerance to flooding stress. **Annals of Botany**, v.103, p.137–142, 2009.
- JACKSON, M. B.; COLMER, T. D. Response and Adaptation by Plants to Flooding Stress. **Annals of Botany**, v. 96, p. 501-505, 2005.
- KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365-371, mar./abr., 2008.

- KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível de um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, jul./set., 2006.
- KLUTE, A. **Water retention: Laboratory Methods**. In: A. KLUTE, ed. *Methods of soil analysis: Part I-Physical and mineralogical methods*. 2 ed. Madison, p.635-662, 1986.
- 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.
- KOKUBUN, M. **Genetic and cultural improvement of soybean for waterlogged conditions in Asia**. *Field Crops Research*. 2013.
- LANGE, et al. **Nova cultivar de soja TECIRGA 6070 RR foi desenvolvida para o cultivo em solos arroseiros gaúchos**. Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, VIII, Santa Maria, RS, 2013.
- LAPEN, D. R. C. et al. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 151-170, aug., 2004.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advanced Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985.
- LIMA, B. A. D. et al. Competição de cultivares de soja tolerante a lagartas cultivadas em ambiente de varzea na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. **Revista Congrega Urcamp** (CD-Rom), v. 1, p. 1-8, 2014. a
- LIMA, B. A. D. et al. Desempenho produtivo de cultivares de soja produzidas em ambiente de varzea e seu potencial germinativo. **Revista Congrega Urcamp** (CD-Rom), v. 1, p. 1-9, 2014. b
- LIMA, C. L. R. et al. Atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1849-1855, set./out., 2008.
- LIMA, C. L. R. et al. Compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 2, p. 179-182, abr./jun., 2006.
- LIMA, C. L. R. et al. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 199-205, jan./fev., 2003.

- MACHADO, R. L. T. et al. Estudo de parâmetros físicos em solo de várzea, antes e após escarificação. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 2, n. 3, p. 175-178, set./dez., 1996.
- MAGNESCHI, L., PERATA, P. Rice germination and seedling growth in the absence of oxygen. **Ann. Bot.** v.103, p. 181–196. 2009.
- MARCHESAN, E. et al. Efeito do pisoteio bovino em algumas propriedades físicas do solo de várzea. **Ciência Rural** (UFSM. Impresso), Santa Maria/RS, v. 30, n.5, p. 965-969, 2000.
- MARCHESAN, et al. **Resposta de sistemas de implantação na resistência mecânica do solo a penetração e na produtividade de soja em área de várzea.** Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, VIII, Santa Maria, RS, 2013.
- MARCHEZAN, E. et al. Produção animal em várzea sistematizada cultivada com forrageiras de estação fria submetidas a diferentes níveis de adubação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 303-308, 2002.
- MARCHEZAN, E. et al. Produção de forrageiras de inverno em diferentes espaçamentos entre drenos superficiais sob pastejo animal em várzea. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.28, n.3, p.393-397, 1998.
- MENTGES, M. I. et al. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 221-231, fev., 2013.
- MENTGES, M. I. et al. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 315-321, mar., 2010.
- MENTGES, M. I. **Implicações do uso nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um argissolo vermelho-marelo e de um gleissolo háplico.** 2010. 107 p. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria, CCR, PPGCS, RS, 2010.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n.3, p.963-969, maio/jun., 2004.
- MOMEN, N.M.; CARLSON, R.E.; SHAW, R.H.; ARJMAND, O. Moisture-stress effects on the yield components of two soybeans cultivars. **Agronomy Journal**, v.71,n.1, p.86-90, 1979.

- MORENO, José Alberto. 1961. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, 42p. 1961.
- MULLER, E. A. **Capacidade de preparos de solo reduzirem limitações físicas naturais de áreas de várzea para o cultivo de soja.** 2015. 84 p. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria, CCR, PPGCS, RS, 2015.
- MUNARETO J. D. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.12, p.1499-1506, dez. 2010.
- NAKAYAMA, N. et al. The effect of flooding stress at the germination stage on the growth of soybean in relation to initial seed moisture content. **Jpn. J. Crop Sci.** v. 73, p. 323–329. 2004.
- NAKAYAMA, N. et. al. Effects of water absorbing rate of seed on flooding injury in soybean. **Jpn. J. Crop Sci.** v. 74, p. 325–329. 2005.
- NETO, A. N. da S. de. Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 36 (1): 29-35, 2006.
- NUNES, M. L. et al. Características de solos sistematizados em duas áreas cultivadas com arroz sob inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:395-406, 2002.
- NUNES, M. R. et al. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, v.259-260, p.149-155, 2015.
- OOSTESHUIS, D.M., et al. Physiological responses of two soybean [*Glycine max* L. Merr.] cultivars to short term flooding. **Environ. Exp. Bot.** v. 30, p 85–92. 1990.
- PARFITT, J. M.B., **Produção de milho e sorgo na várzea.** (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 74.) 146 p. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2000.
- PAULETTO, E. A. et al. Avaliação da densidade e da porosidade de um Gleissolo submetido a diferentes sistemas de cultivo e diferentes culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 2, p. 207-210, abr./jun., 2005.
- PEDROTTI, A. et al. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 709-715, abr., 2001.
- PINTO, L.F.S. et al. **Solos de várzea do sul do Brasil cultivados com arroz irrigado.** In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JR., A.M. Arroz irrigado no sul do Brasil. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.75-95.

- PIRES, J. L. F.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v. 37, n. 1, p. 41-50, 2002.
- PRADO, E. A. F. et al. Efeito da escarificação de um latossolo vermelho em pós colheita de cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v.37, n.4, Lisboa, 2014.
- PREVEDELLO, J. et al. A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 557-566, 2013.
- REGO, P.G. Economia das rotações de cultura em plantio direto. **Revista Mensal Batavo**, 31:20 - 28, 1994.
- REICHERT, J. M. et al. Agregação de um Planossolo sistematizado há um ano e sob cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 837-844, mai./jun., 2006.
- REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.
- REICHERT, J. M. et al. Qualidade de solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, jul./dez., 2003.
- REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, mar., 2009a.
- REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310-319, mar., 2009b.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, v.36, n.6, p.1931-1935, 2006.
- REIS, J. C. L.; SAIBRO, J. C. **Rotação e sucessão de culturas em áreas de várzea**. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JR., A.M. Arroz irrigado no sul do Brasil. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.
- REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2014/2015 e 2015/2016**. / XL Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul ; organizada por Ana Claudia Barneche de Oliveira e Ana Paula Schneid Afonso da Rosa. – Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014.

- REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO .LVIII Reunião Técnica Anual de Milho e XLI Reunião Técnica Anual de Sorgo: **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul safras 2013/2014 e 2014/2015** / editores técnicos, Beatriz Marti Emygdio, Ana Paula Schneid Afonso da Rosa e Mauro César Celaro Teixeira. – Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- RHINE, M.D. et al. Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. **Irrig.Sci.**v. 28, p.135-242, 2010.
- RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, V.26, n.3, p.321-344, jul./set., 2005.
- ROCKSTROM, J. et al. Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. **PNAS**, v.104, n.15, p.6253–6260, 2007.
- RODRIGUES, J. F. **Manejo da água na cultura do milho em Gleissolo Háptico distrófico típico**. 2015. 52p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH, RS, 2015.
- SAIRAM, R.K. et al. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. **Biol. Plant.** v. 52, p. 401–412. 2008.
- SANTOS, H. G. dos. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.
- SANTOS, H. P. dos. et al. Efeito de manejos de solo e de rotação de culturas de inverno no rendimento e doenças de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.35 n.12. Brasília Dec. 2000.
- SCHÖFFEL, E. R. et al. Excesso hídrico sobre os componentes do rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, v.31, n.1, p.7-12, 2001.
- SCOTT, H.D. et al. Flood duration effectson soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, v.81, p.631-636, 1989.
- SERRES, B. J.; VOESENEK, L. A. C. J. Flooding Stress: Acclimations and Genetic Diversity. **Annual Review of Plants Biology**, v. 59, p. 313-39, 2008.
- SHIMAMURA, S. et al. Stem hypertrophic lenticels and secondary aerenchyma enable oxygen transport to roots of soybean in flooded soil. **Ann. Bot.** v. 106, p. 277–284. 2010.
- SILVA, A. P. et al. Funções de pedotransferência para curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1-10, jan./fev., 2008.

- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, nov./dec., 1994.
- SILVA, C. A. S. da et al. **Sistema sulco/camalhão para irrigação e drenagem em áreas de várzea**. Comunicado técnico. ISSN 1806-9185. Pelotas, RS. Dezembro, 2007.
- SILVA, M. A. S. et al. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 329-337, mar./abr., 2006.
- SILVA, M. L. N. et al. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2485-2492, dez., 2000.
- SILVA, P. R. F. da; SCHOENFELD, R. **Desafios e perspectivas da rotação com milho**. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 8, Santa Maria: UFSM. Anais ... 2013.
- SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. **Soil compaction problems in world agriculture**. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. (ed). Soil compaction in crop production. Netherlands : Elsevier, p.1-21, 1994.
- STANLEY, C.D. et al. Soybean top and root response to temporary water tables imposed at three different stages of growth. **Agronomy Journal**, Madison, v.72, p.341-346, 1980.
- SUZUKI, L. E. A. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 64-70, 2015.
- TAIZ L.; ZEIGER, R. **Fisiologia Vegetal**. 4. ed. Porto Alegre, Artmed, 848 p. 2009.
- TAKAHASHI, T. et al. N₂ fixation of nodules and N absorption by soybean roots associated with ridge tillage on poorly drained upland fields converted from rice paddy fields. **Soil Science and Plant Nutrition**.v. 52, p. 291-299, 2006.
- TAVARES FILHO, J. et al. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n.3, p. 725–730, maio/jun., 2001.
- THEISEN, G. et al. **Manejo da cultura da soja em terras baixas em safras com El-Niño**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 4 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular técnica, 82).
- THOMAS, A. L. et al. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean. **Annals of Botany**, Oxford, v. 96 n.7, p. 1191-1198, 2005.

- TIAN, X.H.Th et al. Thee role of seed structure and oxygen responsiveness in pre-germination flooding tolerance of soybean cultivars. **Plant Prod. Sci.** v. 8, p. 157–165. 2005.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, out./dez., 1998.
- VERNETTI JUNIOR, F. J. et al. Sucessão de Culturas em Solos de Várzea Implantadas nos Sistemas Plantio Direto e Convencional. **Revista Brasileira de Agrociencia** (UFPEL), v. 15, p. 37-42, 2009.
- VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1271-1280, nov./dez., 2007.
- VOESENEK, L.A.C. et al. How plants cope with complete submergence. **New Phytol.** v. 170, p. 213–226. 2006.