

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da
Água



Dissertação

**Manejo do trevo persa e da adubação nitrogenada para o arroz irrigado:
dinâmica de nutrientes no solo e resposta de plantas**

Cristiano Weinert

Pelotas, 18 de fevereiro de 2021

Cristiano Weinert

**Manejo do trevo persa e da adubação nitrogenada para o arroz irrigado:
dinâmica de nutrientes no solo e resposta de plantas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Dr. Filipe Selau Carlos

Coorientador: Dr. Rogério Oliveira de Sousa

Pelotas, 18 de fevereiro de 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

W423m Weinert, Cristiano

Manejo do trevo persa e da adubação nitrogenada para o arroz irrigado: dinâmica de nutrientes no solo e resposta de plantas / Cristiano Weinert ; Filipe Selau Carlos, orientador ; Rogério Oliveira de Sousa, coorientador. — Pelotas, 2021.

87 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Leguminosa hibernal. 2. Manejo químico. 3. Nitrogênio mineral. 4. Solução do solo. I. Carlos, Filipe Selau, orient. II. Sousa, Rogério Oliveira de, coorient. III. Título.

CDD : 633.18

Cristiano Weinert

Manejo do trevo persa e da adubação nitrogenada para o arroz irrigado:
dinâmica de nutrientes no solo e resposta de plantas

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 18 de fevereiro de 2021 às 8 horas e 30 minutos

Banca examinadora:

Pesq. Dr. Filipe Selau Carlos (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Pesq. Dra. Amanda Posselt Martins

Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Pesq. Dr. Ibanor Anghinoni

Doutor em Agronomia/Ciência do Solo pela Purdue University

Dedico este trabalho aos meus pais
Ilmar Weinert e Ivone Gonçalves Weinert, minha irmã
Veridiana Weinert e minha sobrinha Katherine
Weinert Bager, que não mediram esforços para que
eu chegasse até aqui.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, por tudo o que me concedeste e por estar comigo em todos os momentos dessa caminhada, em especial por ter me agraciado com pessoas especiais.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais Ilmar Weinert e Ivone Gonçalves Weinert, a minha irmã Veridiana Weinert e a minha sobrinha Katherine Weinert Bager os quais me incentivaram e apoiaram desde a realização do ENEM até o momento em que me encontro.

Ao professor Filipe Selau Carlos, pela orientação, amizade, dedicação, ensinamentos, oportunidade e exemplo profissional.

Ao professor Rogério Oliveira de Sousa, pela coorientação, disponibilidade, ensinamentos e experiências transmitidas.

Ao Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, professores, funcionários, estagiários e colegas pela receptividade, disponibilidade, aprendizado e companheirismo.

À Granjas 4 Irmãos por ceder a área experimental para realização do estudo e estrutura disponibilizada, em especial aos Eng. Agr. Jorge Rieffel e João Carlos Lima, pela disponibilidade, ajuda e ensinamentos transmitidos.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) e seus funcionários, especialmente o Eng. Agr. Maicon Lages Campelo e o Téc. Agr. Edegar Mateus Bortowski, por toda ajuda e tempo disponibilizado.

Aos amigos e que estiveram comigo ao longo dessa caminhada sou grato pelo apoio que vai além dos limites das salas de aula.

À CAPES pela bolsa de estudos.

Meu muito obrigado!!!

Resumo

WEINERT, Cristiano. **Manejo do trevo persa e da adubação nitrogenada para o arroz irrigado: dinâmica de nutrientes no solo e resposta de plantas.** 2021. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

A produção brasileira de arroz provém, predominantemente, das lavouras irrigadas do Rio Grande do Sul. Nessa região, a maioria dos solos de terras baixas cultivados com arroz irrigado, permanecem tradicionalmente em pousio no período outono/inverno, devido ao seu hidromorfismo e pela dificuldade de encontrar plantas de coberturas que se adaptem a essa característica. Nos últimos anos, observou-se o aumento da adoção de trevo persa (*Trifolium resupinatum* L.). Porém, pouco se sabe sobre os benefícios que essa leguminosa hiberna pode deixar para o sistema. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar no Capítulo 1: a disponibilidade de nutrientes no solo, a nutrição de plantas e a produtividade de grãos de arroz irrigado em sucessão ao trevo persa no período outono/inverno em um Planossolo; e, no Capítulo 2: avaliar o efeito de épocas de manejo químico do trevo persa sobre os componentes de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado e a disponibilidade de nutrientes na solução do solo. Foram utilizados os seguintes tratamentos: Capítulo 1: em condições de campo, trevo persa e pousio, compostos de 4 doses de N, sendo: 0, 60, 120, 180 kg N ha⁻¹ e Capítulo 2: Experimento de casa de vegetação com trevo persa e pousio, com 4 épocas de manejo químico, (0, 15, 30, 45) dias antes da semeadura do arroz irrigado, com duas doses de N, 0 e 150 kg N ha⁻¹. O cultivo no período hiberna de trevo persa aumenta a disponibilidade de N mineral no solo, reduz em 23% a dose de máxima eficiência econômica de N para o híbrido de arroz estabelecido em sucessão. O manejo químico do trevo persa aos 45 dias antes da semeadura do arroz reduziu em 58% a quantidade de matéria seca no período de outono/inverno, enquanto o seu manejo químico mais próximo da semeadura do arroz resulta em maior teor de N mineral na solução do solo. O cultivo dessa leguminosa aumenta a disponibilidade de N mineral na solução do solo em 108% no período vegetativo de desenvolvimento do arroz. Os maiores intervalos de manejo químico aumentaram também o teor de fósforo e potássio na solução do solo no período vegetativo de desenvolvimento de plantas de arroz. Dessa forma, o uso da leguminosa hiberna em sistemas de produção de arroz irrigado no Sul do Brasil é uma alternativa promissora, pois possui adaptação ao excesso hídrico, alta capacidade de produção de biomassa e contribui com o aporte de N ao solo com reflexos na menor necessidade de adubação nitrogenada na cultura do arroz. Este contexto possibilita maior rentabilidade econômica aos orizicultores e menor potencial impacto no ambiente em decorrência do menor aporte de N.

Palavras chave: leguminosa hiberna, manejo químico, nitrogênio mineral, solução do solo.

Abstract

WEINERT, Cristiano. **Management of Persian clover and nitrogen fertilization for irrigated rice: dynamics of nutrients in the soil and plant response**. 2021. 88 p. Dissertation (Master of Science) - Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

Brazilian rice production predominates in the south of the country. In this region, most lowland soils cultivated with irrigated rice traditionally remain fallow in the autumn/winter period, due to its hydromorphism and difficulty to find cover plants that adapt to this characteristic. In recent years, there has been an increase in the adoption of Persian clover (*Trifolium resupinatum* L.). However, little is known about the benefits that this winter legume can bring to the system. In this sense, the objective of this work was to evaluate in Chapter 1: the availability of nutrients in the soil, plant nutrition and the productivity of irrigated rice grains in succession to the Persian clover in the autumn/winter period in a Albaqualf; and, in Chapter 2: to evaluate the effect of times of chemical management of the persian clover on the development components of the irrigated rice and the availability of nutrients in the soil solution. The following treatments were used: Chapter 1: under field conditions, persian clover and fallow, composed of 4 doses of N, being: 0, 60, 120, 180 kg N ha⁻¹ and Chapter 2: Greenhouse experiment with persian clover and fallow, with 4 times of chemical management, (0, 15, 30, 45) days before sowing of irrigated rice, with two doses of N, 0 and 150 kg N ha⁻¹. The cultivation of persian clover in the winter period increases the availability of mineral N in the soil, reducing by 23% the dose of maximum economic efficiency of N for the rice hybrid established in succession. The chemical management of persian clover 45 days before rice sowing reduced the amount of dry matter in the autumn/winter period by 58%, while its chemical management closer to rice sowing results in a higher mineral N content in the solution. from soil. The cultivation of this legume increases the availability of mineral N in the soil solution by 108% in the vegetative period of rice development. The longest intervals of chemical management also increased the phosphorus and potassium content in the soil solution in the vegetative period of rice plant development. Thus, the use of the winter legume in irrigated rice production systems in southern Brazil is a promising alternative, as it has adaptation to excess water, high biomass production capacity and contributes to the contribution of N to the soil with minor effects need for nitrogen fertilization in rice. This context allows for greater economic profitability to rice farmers and less potential impact on the environment due to the lower N input.

Keywords: winter legume, soil solution, chemical management, mineral nitrogen.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição das unidades experimentais no campo, ano agrícola 2018/2019. Granja 4 Irmãos, Rio Grande-RS.	33
Figura 2. Imagem aérea do experimento a campo do ano agrícola 2018/2019, com parcelas sob cultivo de trevo persa e pousio. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS.	34
Figura 3. Coleta de trevo persa para determinação da matéria seca. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS.	35
Figura 4: Massa de matéria seca de trevo persa cultivar Lightning cultivado em Planossolo no período de outono inverno dos anos de 2018 e 2019. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS.	40
Figura 6. Teores de nitrogênio mineral (amônio e nitrato) trocáveis sob cultivo de trevo persa e pousio em Planossolo após o período de manejo químico até o período vegetativo da cultura do arroz irrigado nos anos agrícolas 2018/2019 (a) e 2019/2020 (b), camada de 0-5 cm. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. *(p<0,05).	41
Figura 7: Teores de carbono da biomassa microbiana (a) e nitrogênio da biomassa microbiana (b) em Planossolo sob cultivado com trevo persa e pousio no período de outono inverno com estabelecimento de arroz irrigado em sucessão. Ano agrícola 2019/20. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. * (p<0,05).	43
Figura 8. Estatura e panículas de arroz irrigado em sucessão a trevo persa sob doses crescentes de nitrogênio. Híbrido XP 113. Ano agrícola 2018/19. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. ns: não diferiu estatisticamente.	45
Figura 9. Índice de clorofila (a), balanço de nitrogênio (b), antocianinas (c) e flavonoides (d) em folhas de arroz irrigado cultivado em sucessão a trevo persa sob doses crescentes de nitrogênio. Híbrido XP 113. Ano agrícola 2018/19. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. * (p<0,05).	46
Figura 10. Relação de índice de clorofila (a), balanço de nitrogênio (b), antocianinas (c) e flavonoides (d) com produtividade de arroz irrigado cultivado em sucessão a trevo persa sob doses crescentes de nitrogênio. Híbrido XP 113. Ano agrícola 2018/19. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. * (p<0,05).	47

Figura 11. Produtividade de arroz irrigação em sucessão a trevo persa sob doses crescentes de nitrogênio. Híbrido XP 113. Anos agrícolas 2018/19 (a) e 2019/20 (b). Granja 4 Irmãos, Rio Grande-RS. * (p<0,05).	48
Figura 12. Instalação dos extratores de solução do tipo espiral nos vasos previamente à semeadura da cultura do trevo persa.	59
Figura 13. Instalação dos extratores de solução do tipo espiral nos vasos previamente à semeadura da cultura do trevo persa. FAEM/UFPeI, Capão do Leão-RS.	59
Figura 14. Avaliação dos parâmetros fisiológicos realizada com o clorofilômetro em estágio fenológico R ₀ . FAEM/UFPeI, Capão do Leão-RS.	61
Figura 15. Massa de matéria seca da parte aérea de trevo persa, cultivar Lighting, sob diferentes tempos de manejo químico antes da semeadura do arroz. * significativo (p<0,05). FAEM/UFPeI, Capão do Leão-RS.	63
Figura 16. Teores de nitrogênio mineral (NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻) na solução (a) do solo após o alagamento sob diferentes tempos de manejo químico do trevo antes da semeadura do arroz. Figuras (b) e (c) com os dados médios do período vegetativo, primeiros 30 dias de alagamento. *significativo p/ coberturas e ** p/ doses de N (p<0,05). Letras minúscula e maiúscula comparam dose de 0N e 150N, respectivamente, pelo teste de Tukey (p<0,05). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPeI, Capão do Leão-RS.	65
Figura 17. Teores de fósforo na solução (a) do solo após o alagamento sob diferentes tempos de manejo químico do trevo antes da semeadura do arroz. Figuras (b) e (c) com os dados médios do período vegetativo, primeiros 30 dias de alagamento. *significativo p/ coberturas e ** p/ doses de N (p<0,05). Letras minúscula e maiúscula comparam dose de 0N e 150N, respectivamente, pelo teste de Tukey (p<0,05). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPeI, Capão do Leão-RS.	67
Figura 18. Teores de potássio na solução (a) do solo após o alagamento sob diferentes tempos de manejo químico do trevo antes da semeadura do arroz. Figuras (b) e (c) com os dados médios do período vegetativo, primeiros 30 dias de alagamento. *significativo p/ coberturas e ** p/ doses de N (p<0,05). Letras minúscula e maiúscula comparam dose de 0N e 150N, respectivamente, pelo teste de Tukey (p<0,05). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPeI, Capão do Leão-RS.	69

Figura 19. Quantidade de nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) absorvidos por vaso nos diferentes intervalos de manejo químico de trevo persa com cultivo de arroz irrigado em sucessão. Letras minúscula e maiúscula comparam dose de 0N e 150N, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPEL, Capão do Leão-RS. 71

Figura 20. Matéria seca da parte aérea de arroz (a) em duas doses de N, 0 e 150 kg N ha⁻¹, cultivar IRGA 424 RI e correlação entre produção de matéria seca da parte aérea de trevo e matéria seca da parte aérea de arroz irrigado (b) sob diferentes tempos de manejo químico do trevo antes da semeadura do arroz. * significativo ($p < 0,05$). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPEL, Capão do Leão-RS..... 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Doses de máxima eficiência técnica e econômica de adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado em sucessão a trevo persa e pousio. Híbrido XP 113, anos agrícolas 2018/19 e 2019/20, Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS.	49
Tabela 2. Atributos do Panossolo háplico previamente ao estabelecimento do experimento em casa de vegetação. Capão do Leão-RS, 2019.	58
Tabela 3. Índice de clorofila, flavonoides, antocianinas e balanço de nitrogênio de folhas de arroz sob diferentes tempos de manejo químico de trevo persa previamente a semeadura de arroz irrigado nas doses de 0 e 150 kg N ha ⁻¹ . FAEM/UFPel, Capão do Leão-RS.	74

LISTA DE ABREVIATURAS

Al^{3+} - Alumínio

C – Carbono

C:N – Relação Carbono/Nitrogênio

CBM – Carbono da Biomassa Microbiana

CTC – Capacidade de Troca de Cátions

DAA – Dias Após o Alagamento

DMEE – Dose de Máxima Eficiência Econômica

DMET – Dose de Máxima Eficiência Técnica

FBN – Fixação Biológica de Nitrogênio

Fe^{3+} - Óxido de Ferro

H_2SO_4 – Ácido Sulfúrico

H_3BO_3 – Ácido Bórico

ha – Hectare

K – Potássio

K_2O – Óxido de Potássio

K_2SO_4 – Sulfato de Potássio

KCl – Cloreto de Potássio

M – Molar

m^2 – Metros Quadrados

MMS – Massa de Matéria Seca

Mn^{2+} - Óxido de Manganês

MO – Matéria Orgânica

MOS – Matéria Orgânica do Solo

MS – Matéria Seca

N – Nitrogênio

N_2 – Nitrogênio Elementar

N_2O – Óxido Nitroso

NBM – Nitrogênio da Biomassa Microbiana

NH_3 – Amônia

NH_4^+ - Amônio

NO – Óxido Nítrico

NO_2^- - Nitrito

NO_3^- - Nitrato

O_2 – Oxigênio

P - Fósforo

P_2O_5 – Pentóxido de Difósforo

R_0 – Estádio Fenológico Reprodutivo 0

R_2 - Estádio Fenológico Reprodutivo 2

R_4 - Estádio Fenológico Reprodutivo 4

RS – Rio Grande do Sul

SC – Santa Catarina

SO_4^{2-} - Sulfato

V_3 – Estádio Fenológico Vegetativo 3

Sumário

1 INTRODUÇÃO GERAL	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Contexto da produção de arroz no Rio Grande do Sul.....	20
2.2 Demanda de nitrogênio pela cultura do arroz irrigado.....	21
2.3 Processos de perdas de nitrogênio em solos alagados	23
2.4 Capacidade de suprimento de nitrogênio de solos cultivados com arroz irrigado	24
2.5 Uso de leguminosas em sucessão ao arroz irrigado.....	25
2.6 Impactos da adição de resíduos de alta labilidade nas alterações redox de solos sob alagamento	27
3 HIPÓTESES.....	29
4 OBJETIVOS	30
4.1 Objetivo geral	30
4.2 Objetivos específicos	30
5 CAPÍTULO 1: DINÂMICA DE NUTRIENTES NO SOLO E RESPOSTA DE ARROZ IRRIGADO EM SUCESSÃO AO TREVO PERSA	31
5.1 Introdução	31
5.2 Material e métodos.....	32
5.2.1 Histórico da área, tratamentos e manejo do solo	32
5.2.2 Evolução do crescimento do trevo persa.....	35
5.2.3 Amostragem de solo e determinação do nitrogênio mineral.....	35
5.2.4 Amostragem de solo e determinação do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana.....	36
5.2.5 Avaliações de componentes de rendimento de plantas de arroz	38
5.2.6 Atributos fisiológicos.....	38
5.2.7 Análise estatística	39
5.3 Resultados	39

5.3.1 Crescimento do trevo persa	39
5.3.2 Nitrogênio mineral do solo	40
5.3.3 Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana	42
5.3.4 Estatura e número de panículas do arroz irrigado.....	44
5.3.5 Atributos fisiológicos do arroz irrigado.....	46
5.3.6 Produtividade e doses de máxima eficiência técnica e econômica no arroz irrigado	47
5.4 Discussão.....	49
5.4.1 Crescimento do trevo persa	49
5.4.2 Nitrogênio mineral do solo.....	50
5.4.3 Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana	51
5.4.4 Estatura e número de panículas no arroz irrigado.....	52
5.4.5 Atributos fisiológicos.....	52
5.4.4 Produtividade e dose de máxima eficiência econômica e técnica no arroz irrigado	53
5.6 CONCLUSÕES	55
6 CAPÍTULO 2: ÉPOCAS DE MANEJO QUÍMICO DE TREVO PERSA E O IMPACTO NA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E O DESENVOLVIMENTO DO ARROZ IRRIGADO.....	56
6.1 Introdução	56
6.2 Material e métodos.....	58
6.2.1 Instalação e solo utilizado no experimento.....	58
6.2.2 Evolução e desenvolvimento do trevo persa e do arroz irrigado	59
6.2.3 Parâmetros fisiológicos	60
6.2.4 Teores de nutrientes na matéria seca do arroz	61
6.3 Análise estatística dos dados	61
6.4 Resultados	62
6.4.1 Produção de massa de matéria seca da parte aérea do trevo persa	62

6.4.2 Nitrogênio, fósforo e potássio na solução do solo	63
6.4.3 Produção de matéria seca de arroz	72
6.4.4 Parâmetros fisiológicos nas plantas de arroz	74
6.5 Discussão.....	74
6.6 Conclusões.....	79
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO GERAL

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais cultivados e importantes no mundo, pois é um alimento básico para cerca de 4,4 bilhões de pessoas, com estimativa de aumento na sua demanda de 20-30% até 2050. No mundo, o arroz é o segundo grão mais produzido, ficando somente atrás do milho. Fora do continente asiático o Brasil é o principal produtor de arroz, ficando na nona posição mundial. Porém, no Mercosul destaca-se como maior produtor, com uma produção anual entre 11 e 13 milhões de toneladas nas últimas safras. O estado brasileiro que apresenta a maior produção desse cereal é o Rio Grande do Sul (RS), sendo responsável por cerca de 70% do arroz produzido no país.

No Brasil, o arroz é cultivado em dois ecossistemas distintos: em áreas de terras baixas e em áreas de terras altas. O arroz de terras baixas se caracteriza principalmente pela utilização de irrigação por inundação, enquanto que, em terras altas, ele é cultivado em condições de sequeiro, dependendo apenas da água das precipitações pluviométricas ou de irrigação suplementar por aspersão. No RS, o arroz é majoritariamente produzido no sistema de irrigação por inundação nas áreas de terras baixas. Na grande maioria das áreas, com cultivos seguidos de arroz ou em rotação com soja e pecuária de corte. O sistema sob monocultivo de arroz, preparo anual de solo e ausência de coberturas hibernais, vem apresentando frequentemente problemas como degradação do solo, infestação por plantas daninhas e baixa produtividade. Esse sistema de produção vem sendo utilizado por décadas, resultando na redução da disponibilidade de nutrientes, desestruturação e compactação do solo através do preparo convencional com maquinários cada vez mais pesados.

Nesse contexto de produção, há alguns desafios para promover o aumento do suprimento de nutrientes à cultura do arroz em um sistema onde as cultivares modernas de alta produtividade são cada vez mais responsivas, principalmente ao nitrogênio (N). O arroz irrigado é altamente exigente em N. Em algumas situações, para obtenção de altos níveis de produtividade (10 a 11 Mg ha⁻¹), são necessárias doses de 150 a 170 kg N ha⁻¹ em solos com teores entre 1,0 a 2,0% de matéria orgânica do solo (MOS) (ANGHINONI & CARLOS, 2018). Cerca de 80% dos solos cultivados com arroz irrigado no RS apresentam teores

de matéria orgânica (MO) inferiores a 2,5% (BOENI *et al.*, 2010). A exceção a essa condição são os Vertissolos e Chernossolos, de maior ocorrência na Fronteira Oeste e Campanha, que tem maiores teores de MO e podem propiciar maior suprimento de N às plantas. Além disso, o preparo frequente dos solos de terras baixas não permite o aumento e causa até mesmo a redução dos níveis de MO e suas frações lábeis, que são essenciais no suprimento de N às plantas.

As culturas agrícolas, em geral, possuem uma baixa eficiência de uso N. Em solos alagados, devido à ocorrência de perdas como a desnitrificação, a eficiência de uso do N pode ser inferior a 50% em algumas situações (ARAMBURU *et al.*, 2018). Soma-se a essas questões o fato de boa parte (~80%) das áreas cultivadas com arroz permanecerem em pousio no período de outono/inverno (IRGA, 2019), onde se perde a oportunidade de aportar e ciclar nutrientes no solo, com leguminosas hibernais por exemplo, e há um favorecimento de perda por lixiviação e escoamento dos nutrientes mineralizados dos resíduos vegetais das culturas de verão.

Desse modo, o estabelecimento de leguminosas hibernais no período de outono/inverno pode ser uma alternativa para aumentar o aporte de N ao solo em razão do processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) e posterior decomposição e ciclagem. Devido a esses fatores, buscam-se novas alternativas de manejos que visam aumentar o suprimento de N para a cultura do arroz irrigado com uso de leguminosas hibernais adaptadas aos ambientes de terras baixas.

Em ambientes de terras altas, há conhecimento bastante aprofundado a respeito do uso de leguminosas hibernais e seus benefícios para culturas de verão, inclusive que constam no atual sistema de recomendação de calagem e adubação para os Estados do RS e Santa Catarina (SC) (CQFS RS/SC, 2016). Contudo, o uso dessas espécies em solos de terras baixas no Sul do Brasil ainda é bastante incipiente (GARCIA, 2020), principalmente pelo fato do excesso hídrico reduzir drasticamente as opções de leguminosas hibernais. Além disso, o uso de leguminosa hibernal em terras baixas pode ter uma série de reflexos na liberação de nutrientes na solução do solo alagado cultivado com arroz irrigado. A taxa de liberação de nutrientes em solo alagado deve ser distinta da de terras altas, devido à condição de hipóxia que afeta o metabolismo microbiano do solo e a velocidade de mineralização de resíduos vegetais.

Dessa forma, há uma grande lacuna em relação a essa temática, e pesquisas nessa área podem contribuir com informações, científicas e técnicas, com aplicabilidade direta nos sistemas de produção em terras baixas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contexto da produção de arroz no Rio Grande do Sul

O RS possui aproximadamente 6,5 milhões de hectares (ha) de terras baixas, aptos para o cultivo do arroz irrigado (MIURA *et al.*, 2015). Esses solos apresentam má drenagem, densidade e relação micro/macroporos naturalmente elevadas, baixa capacidade de armazenamento de água superficial e, em alguns casos, combinadas a uma fertilidade natural de baixa a média, o que dificulta a utilização de uma agricultura diversificada (GOMES *et al.*, 2002). Essas áreas são caracterizadas pela topografia plana e de difícil drenagem que está relacionada não apenas a essa topografia, mas principalmente à ocorrência de solos com horizontes subsuperficiais argilosos de baixa condutividade hidráulica, que dificulta a percolação da água no perfil, sendo essas características adequadas para o cultivo do arroz irrigado, diminuindo as perdas de nutrientes por lixiviação e facilitando a manutenção da lâmina d'água superficial do solo (STRECK *et al.*, 2018; DOS SANTOS *et al.*, 2018).

Anualmente, neste Estado, são cultivados em média cerca de 1,0 milhão de ha de arroz irrigado (IRGA, 2020) nas vastas extensões de áreas de terras baixas em rotação com pecuária extensiva, onde apresentam problemas de degradação do solo, infestação por plantas invasoras e baixa produtividade (SCIVITTARO *et al.*, 2007). Por décadas, o uso intensivo dessas áreas resultou na degradação física e química do solo. No que diz respeito à parte física, o uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas pesados, utilizados para o preparo convencional das lavouras, estão agravando ainda mais problemas frequentes (como formação de camadas compactadas, redução da MO e degradação da estrutura) nesses tipos de solos (hidromórficos) (PEDROTTI *et al.*, 2001). Somando-se ao sucessivo preparo ao longo dos anos, problemas como, drenagem e compactação subsuperficial, dificultam a aeração e a

movimentação da água desses solos (PAULETTO *et al.*, 1993, GUBIANI *et al.*, 2018).

Os principais sistemas de cultivo utilizados nas lavouras orizícolas do RS são: (a) sistema convencional, usado geralmente quando o produtor não consegue realizar o preparo antecipado ou em áreas novas, (b) preparo antecipado, cultivo mínimo onde o solo é preparado antecipadamente e o arroz é semeado sobre as curvas de níveis ou em áreas sistematizadas, e plantio direto pouco utilizado, devido à empecilhos desse manejo, (c) pré-germinado, semeadura de sementes pré-germinadas em áreas sistematizadas, sendo semeadas 24,5%, 64,5% e 11% das áreas com cada sistema respectivamente nas safras 2017/2018 e 2018/2019 (IRGA, 2019).

Esses sistemas de produção de arroz utilizam a irrigação por inundação contínua, com a manutenção da lâmina de água por um período médio de 80 a 100 dias, dependendo do ciclo de cada cultivar. Logo após o estabelecimento da lâmina de água, o solo sofre alterações devido às mudanças nas suas características químicas, físicas e biológicas (SOUSA *et al.*, 2010), interferindo na agregação do solo.

Devido a esses fatores citados, estes sistemas de produção vêm sendo questionados quanto à sustentabilidade de suas práticas de manejo. Por este motivo, novas alternativas de manejo mais eficientes e economicamente viáveis, estão sendo buscadas para diminuir a infestação de plantas daninhas e problemas de compactação do solo, aumentar o teor de MOS e intensificar o uso dessas áreas. Nesse sentido, é necessário adotar sistemas de produção mais sustentáveis e conservacionistas, combinando com culturas alternativas que possuam valor comercial como por exemplo a soja, sorgo e milho (HAEFELE, *et al.*, 2013; GOULART, *et al.*, 2019; RIBAS, *et al.*, 2021), como também a utilização de coberturas de inverno que possam contribuir para manutenção da competitividade produtiva, sustentabilidade e aumento da fertilidade do solo nas terras baixas do RS.

2.2 Demanda de nitrogênio pela cultura do arroz irrigado

O N é o nutriente absorvido em maiores quantidades pela maioria das culturas, principalmente pelas gramíneas. Também é o nutriente mais limitante

para o desenvolvimento, produção de biomassa e aumento da produtividade da cultura do arroz irrigado (ANGHINONI & CARLOS, 2018). É absorvido através de duas formas: nitrato (NO_3^-), que é a forma inorgânica oxidada, e amônio (NH_4^+), que é a forma inorgânica reduzida. O NH_4^+ tem sua formação favorecida pelo ambiente anaeróbio e quimicamente reduzido (PONNAMPERUMA, 1972), sendo essa a principal fonte N para o arroz por inundação (KRONZUCKER *et al.*, 2000). Atualmente, o arroz irrigado consome 16% dos fertilizantes nitrogenados no mundo (LADHA *et al.*, 2016). A média global de utilização de N nas lavouras orizícolas é de aproximadamente 120 kg ha^{-1} (LADHA & CHAKRABORTY, 2016).

O N é o segundo nutriente que a planta de arroz mais absorve, ficando atrás somente do potássio (K). No arroz irrigado, o N tem papel fundamental na síntese de clorofila, na constituição de aminoácidos e proteínas com impacto direto no estímulo ao desenvolvimento do sistema radicular, no favorecimento ao perfilhamento, no aumento da área foliar, maior atividade fotossintética, aumento do número de espiguetas, massa de grãos e número de panículas por m^2 e grãos por panícula (HERNANDES *et al.*, 2010).

Uma das mais importantes desordens nutricionais nas áreas produtoras de arroz de terras baixas em todo o mundo é a deficiência de N (FAGERIA & BALIGAR, 2001). O lançamento de novas cultivares associado a mais práticas de manejo mais eficientes contribuíram, nos últimos 30 anos, para o aumento da produtividade de grãos, concomitantemente à maior necessidade de adubação nitrogenada (IRGA, 2019). No ano agrícola de 1994/1995, a produtividade média de arroz irrigado foi de 5.24 Mg ha^{-1} . No último ano agrícola (2019/2020), a produtividade média foi de 8.40 Mg ha^{-1} (IRGA, 2020). Por esse motivo, na maioria das áreas onde o arroz é cultivado, o custo do fertilizante nitrogenado é a segunda maior fração de custo total de produção, ficando atrás apenas dos agroquímicos (SOSBAI, 2018).

A planta de arroz é muito exigente em nutrientes e em solos com baixos teores de MO (1,0 a 2,0%) ocorre resposta das culturas de 150 a 170 kg N ha^{-1} (ANGHINONI & CARLOS, 2018). Além do aporte de N em doses adequadas, a sincronia em cada estágio fenológico da cultura associado a um rápido estabelecimento da irrigação é essencial para mitigar as perdas e ter um suprimento adequado de N ao arroz.

2.3 Processos de perdas de nitrogênio em solos alagados

O N é um dos elementos mais influenciados pelas condições ambientais e manejo na produção do arroz irrigado. Esse elemento possui uma dinâmica complexa devido a reações e processos aos quais está envolvido e a diversidade de suas formas químicas que influenciam a eficiência de uso do N aplicado via fertilizantes minerais (SOUSA, *et al.*, 2010). No RS, as lavouras de arroz conduzidas no sistema tradicional, possuem duas etapas bem diferenciadas quanto ao regime de disponibilidade de oxigênio no solo (aeróbio e anaeróbio) que afetam a disponibilidade de N às plantas.

No sistema de irrigação por alagamento, recomenda-se o estabelecimento da lâmina de água no estágio fenológico V₃ (SOSBAI, 2018) o que desencadeia numa redução drástica de difusão de oxigênio no solo com reflexos em inúmeras reações microbianas e químicas no solo (SOUSA, *et al.*, 2010).

A eficiência do N pelo arroz irrigado está em torno de 40% em solos de várzea (FAGERIA, *et al.*, 2003), devido a perdas por volatilização, nitrificação-desnitrificação e em menor intensidade a lixiviação (baixa taxa de infiltração em razão do Horizonte B textural (Bt)). A principal reação que diminui a eficiência de utilização do N proveniente da ureia aplicada sobre a superfície do solo pelas plantas é a volatilização de amônia (NH₃). O processo de perda do N por volatilização consiste na passagem da NH₃ presente no solo à atmosfera, conforme a seguinte reação: $N-NH_4^+ + OH^- \text{ (aquoso)} \rightarrow H_2O + N-NH_3 \text{ (gás)}$. A volatilização da NH₃ ocorre inicialmente com a hidrólise da ureia por meio da urease, que é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo, ou ainda pode ser originada dos restos vegetais (BYRNES, 2000), e depende das condições edáficas e climáticas. A volatilização da NH₃ também é afetada por outros fatores como: teor de argila do solo, temperatura, trocas gasosas, taxa de evaporação de água, capacidade de troca de cátions e poder tampão (HARGROVE, 1988; BYRNES, 2000).

Outra perda do N em solos alagados é pelo processo de desnitrificação, que é um processo anaeróbio que gera íons de NO₃⁻ utilizados no processo de desnitrificação. Possivelmente esse seja um dos principais processos de perdas.

Os compostos oxidados disponíveis nos solos alagados, servem como aceptores de elétrons para os microrganismos anaeróbios, determinando a instabilidade do NO_3^- sendo rapidamente desnitrificado e perdido para a atmosfera (PONNAMPERUMA, 1972). Essa reação de redução ocorre da seguinte ordem: $\text{NO}_3^- \rightarrow$ nitrito (NO_2^-) \rightarrow óxido nítrico (NO) \rightarrow óxido nitroso (N_2O) \rightarrow N elementar (N_2), sendo esses dois últimos compostos perdidos por volatilização.

As perdas por lixiviação estão relacionadas com a permeabilidade dos solos. Sendo assim, são dificultadas pelas características dos solos cultivados com arroz irrigado, que normalmente se caracterizam pela topografia plana e de difícil drenagem, com ocorrência de horizontes subsuperficiais argilosos, com condutividade hidráulica baixa e proximidade do lençol freático da superfície do solo, dificultando a percolação de água no perfil (PINTO *et al.*, 2017).

Recentemente, outro mecanismo de perda de N_2 para atmosfera vêm sendo alvo de estudos por pesquisadores, principalmente nos países asiáticos. A oxidação anaeróbica do amônio (Anammox) ocorre em solos alagados quando o NO_2^- está presente no sistema. Devido à presença das bactérias que realizam este processo terem sido relatadas em solos cultivados com arroz, estudos considerando esta perda descrevem a importância de conhecer este processo para melhor compreender a dinâmica complexa do N em solos alagados, pois significam aproximadamente 10% das perdas totais na maioria dos casos observados (STROUS *et al.*, 1997; ZHU *et al.*, 2019).

Portanto, o uso racional da adubação nitrogenada é fundamental para aumentar a eficiência do N e a produtividade do arroz e diminuir o custo de produção e os riscos de poluição ambiental. Sendo assim, devem ser adotadas práticas de manejo apropriadas como uso de dose e épocas adequadas de acordo com a necessidade da cultura (FAGERIA *et al.*, 2003).

2.4 Capacidade de suprimento de nitrogênio de solos cultivados com arroz irrigado

Os solos de terras baixas compreendem uma série de classes de solos originados principalmente a partir de sedimentos. No estado do RS, mais de 86% da área desses solos é composta pelas classes Planossolo, Gleissolos,

Chernossolos e Plintossolos (DOS SANTOS *et al.*, 2018). Esses solos possuem em comum que a grande maioria é originária de materiais sedimentares. O Planossolo, que corresponde a mais da metade dos solos cultivados com arroz no Sul do Brasil, é formado a partir de material proveniente de sedimentos aluviais e de granitos e, geralmente, possui baixa disponibilidade de nutrientes (STRECK *et al.*, 2018). Além disso, esses solos possuem na camada superficial (0-20 cm) uma textura predominantemente silto-arenosa o que favorece as perdas de nutrientes (STRECK *et al.*, 2018).

Além da gênese, a textura silto-arenosa do solo de terras baixas possui uma menor área de superfície de contato além de possuir menores teores de óxidos de ferro comparativamente a Latossolos, de ocorrência no Planalto do RS. Em razão disso, os Planossolos, os Gleissolos e outros solos de terras baixas são pobres em MO. Além disso, práticas de manejo, como o frequente revolvimento do solo e a pouca adoção de coberturas de solo/forageiras hibernais contribuem para os baixos teores de MOS e suas frações lábeis (MARTINS *et al.*, 2017).

2.5 Uso de leguminosas em sucessão ao arroz irrigado

O cultivo de espécies forrageiras de inverno, logo após a colheita do arroz, soja ou pastagens de verão é uma prática eficiente de ciclagem de nutrientes. Porém, há uma grande dificuldade de encontrar plantas com características de adaptação aos solos hidromórficos, principalmente com tolerância ao excesso hídrico (VERNETTI JUNIOR *et al.*, 2009a). Assim, a drenagem do solo, é um dos principais fatores para a implantação de coberturas/forageiras no período de outono e inverno nessas áreas. Essa estratégia tem o objetivo de retirar águas excedentes em superfície e subsuperfície com o objetivo de evitar condições de anaerobiose na região do sistema radicular das culturas hibernais.

A utilização de sucessão de culturas em solos de várzea cultivados com arroz irrigado visa ainda diminuir a infestação de plantas daninhas, melhorar o uso do solo e sua qualidade, diversificar a renda, otimizar o uso das máquinas e da mão de obra, romper ciclos de pragas e doenças e aumentar a rentabilidade do produtor (VERNETTI JUNIOR *et al.*, 2009 b).

As coberturas hibernais devem possuir algumas características desejáveis em sistemas que visam o estabelecimento do arroz irrigado, como, produção de fitomassa, capacidade de acumular N (FBN ou absorção do nutriente do solo) e se possível, com baixa relação carbono/nitrogênio (C:N). Existem algumas espécies de coberturas/forageiras que podem ser usadas em sistemas de produção em terras baixas que envolve o cultivo de arroz irrigado. O azevém é a espécie mais utilizada na sucessão com o arroz, devido à disponibilidade de sementes e por sua facilidade de adaptação aos ambientes mais úmidos, servindo tanto para o pastejo como para a proteção do solo, porém não aporta N ao solo. Existem alguns trabalhos (CAI *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2015) que demonstram a importância da utilização de leguminosas hibernais em sucessão ao arroz irrigado, e apontam o aumento do C orgânico e do N mineral do solo como as principais vantagens encontradas do uso desse sistema, incrementando a produção de grãos dessas áreas.

A redução do uso de fertilizantes nitrogenados é desejável tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental e pode ser possível por meio da FBN, reduzindo as perdas e ciclando N através de leguminosas hibernais no período de entressafra (CAI *et al.*, 2018). Segundo Buresh & De Datta (1991), as leguminosas podem contribuir parcialmente com a necessidade de N de um cultivo de arroz em sucessão e o manejo pode reduzir as perdas de N no solo. Porém, para implantar leguminosas hibernais em uma área, é necessária uma boa adubação fosfatada de base (KROLOW *et al.*, 2004), pois essas plantas são exigentes nesse nutriente, além da correção da acidez do solo, visto a alta sensibilidade das leguminosas ao alumínio (Al^{3+}).

Outro fator a ser levado em consideração para a utilização de forrageiras leguminosas é sua baixa relação C:N comparada com as gramíneas. Geralmente, gramíneas produzem maiores quantidades relativamente de matéria seca (MS). Porém, possuem alta relação C:N, resultando em maior tempo de mineralização da fitomassa e imobilização do N liberado dos resíduos (PERIN *et al.*, 2004). Já, as leguminosas apresentam altos teores de N no tecido vegetal e produzem, em geral, palhadas de baixa relação C:N, resultando em uma mineralização relativamente rápida, com disponibilização de N para culturas em sucessão (ALVARENGA *et al.*, 2001).

A adição de plantas de cobertura, possui grande influência na composição e atividade microbiana do solo, bem como na velocidade de decomposição matéria orgânica do solo (CARLOS, 2017). Leguminosas, por exemplo, possuem a capacidade de excretar flavonóides na rizosfera que estimulam simbioses com *rhizobium* e micorrizas, aumentando a mineralização de C e N no solo, principalmente pela qualidade do resíduo, que possui menor relação C:N o que aumenta a atividade microbiana no solo (Balota *et al.*, 2004).

Nesse contexto, o trevo persa pode ser uma alternativa para os solos de terras baixas, pois é uma cultura de estação fria, possui boa adaptação a solos hidromórficos, além de se destacar pela competitividade e produção de MS de qualidade, podendo ser uma alternativa de fornecimento de N para as culturas em sucessão (DA COSTA *et al.*, 2005; BORTOLINI *et al.*, 2012). Portanto, são necessários mais estudos para um melhor entendimento sobre a liberação dos nutrientes das leguminosas hibernais para o arroz irrigado, visto que são poucos os trabalhos que abordam esse assunto.

2.6 Impactos da adição de resíduos de alta labilidade nas alterações redox de solos sob alagamento

O alagamento do solo altera o seu equilíbrio natural, desencadeando uma série de transformações em seus atributos físicos, biológicos, eletroquímicos e químicos. O metabolismo microbiano anaeróbio passa a predominar no ambiente alagado, onde substâncias diferentes do oxigênio (O₂) são utilizadas como aceptores de elétrons no processo de decomposição anaeróbia e fermentação dos resíduos vegetais. Tal processo altera a disponibilidade de nutrientes para o arroz irrigado e tem como principal fator de intensidade a disponibilidade de elétrons para as reações de redução. Assim, a quantidade e a composição química dos resíduos vegetais são os principais fatores que determinam a velocidade de decomposição dos resíduos vegetais em solo alagado, intensidade das reações de oxirredução e composição química da solução do solo durante o alagamento e o desenvolvimento do arroz (SOUSA, 2001).

Os microrganismos anaeróbios reduzem primeiramente os compostos com maior afinidade de receber elétrons, na seguinte ordem: NO₃⁻, óxidos de

manganês (Mn^{2+}) óxidos de ferro (Fe^{3+}) e sulfato (SO_4^{2-}), deixando para reduzir compostos com menos afinidade por elétrons após reduzirem uma parcela significativa desses compostos (SOUSA, 2001).

No arroz irrigado, a adição de resíduos orgânicos através do cultivo de pastagens de inverno ou até mesmo a palhada de arroz do ano agrícola anterior provocam reações diferentes dependendo de sua relação C:N. Por exemplo, por possuir uma alta relação C:N e uma grande massa (7 a 11 Mg ha⁻¹), a palha de arroz adicionada em um ambiente anaeróbico, quando não é incorporada ao solo na entressafra, tem sua decomposição limitada, pois esse ambiente encontra-se em hipóxia, que é menos eficiente nos processos de mineralização (LOBO JUNIOR *et al.*, 2004). Já os resíduos de leguminosas possuem uma relação C:N baixa. Portanto, são facilmente decomponíveis, sendo uma excelente fonte de energia e C para os microrganismos anaeróbios, acelerando o processo de redução do solo e acentuando as transformações eletroquímicas e químicas de um solo alagado (SOUSA, 2001).

Estão surgindo novas alternativas para melhorar o sistema de produção do arroz irrigado, como é o caso do cultivo de outras culturas de grãos no verão, como a soja ou forrageiras/coberturas no período outono/inverno, mudando o sistema de cultivo para sequeiro. Dentre o cultivo de plantas de cobertura, as leguminosas hibernais estão ganhando espaço, muito pela sua capacidade de realizar a FBN e pela baixa relação C:N do seu resíduo, como é o caso do trevo persa, que recentemente, está sendo utilizado por sua adaptação aos solos hidromórficos e pela produção de MS. Porém, não se sabe ao certo quanto de MS pode ser produzida e os seus reflexos na disponibilidade de nutrientes e na cultura do arroz. Além disso, há uma escassez de informações acerca dos momentos mais adequados de manejo químico da leguminosa hiberna com vistas a um suprimento mais adequado de nutrientes para a cultura em sucessão.

3 HIPÓTESES

O uso de trevo persa como leguminosa hiberna aumenta a disponibilidade de nitrogênio mineral e de carbono e nitrogênio microbiano no solo e reduz a necessidade de adubação nitrogenada para a cultura do arroz irrigado estabelecida em sucessão.

O manejo químico da leguminosa hiberna em período mais próximo da semeadura da cultura do arroz irrigado aumenta a concentração de nitrogênio na solução do solo e no tecido das plantas de arroz proporcionando maior produção de matéria seca.

Além do aumento da disponibilidade de nitrogênio no solo, o cultivo de trevo persa no período hiberna proporciona o aumento da ciclagem e disponibilização de fósforo e potássio, que são elementos bastante requeridos pela cultura do arroz irrigado.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Avaliar a disponibilidade de nutrientes no solo, atributos fisiológicos e a nutrição de plantas, produção de matéria seca de arroz e a produtividade de grãos de arroz irrigado em sucessão ao trevo persa no período outono/inverno em um Planossolo.

4.2 Objetivos específicos

i. Avaliar o desenvolvimento da biomassa seca do trevo persa cultivado em um Planossolo no período de outono/inverno.

ii. Avaliar a disponibilidade de amônio e nitrato no solo, o teor de carbono e nitrogênio microbiano do solo e a produtividade de grãos de arroz irrigado em sucessão ao trevo persa.

iii. Avaliar os índices de clorofila, flavonoides, antocianinas e balanço de nitrogênio em plantas de arroz cultivadas em sucessão ao trevo persa.

iv. Calcular as doses de máxima eficiência técnica e econômica da adubação nitrogenada do arroz cultivado em sucessão ao trevo persa.

v. Avaliar a disponibilidade de nitrogênio, fósforo e potássio, bem como a produção de matéria seca de arroz irrigado cultivado em sucessão ao trevo persa submetido a épocas de manejo químico.

5 CAPÍTULO 1: DINÂMICA DE NUTRIENTES NO SOLO E RESPOSTA DE ARROZ IRRIGADO EM SUCESSÃO AO TREVO PERSA

5.1 Introdução

O arroz irrigado é uma cultura que demanda grandes quantidades de nutrientes para obtenção de níveis satisfatórios de produtividade sendo que o N é o elemento mais limitante para o desenvolvimento dessa cultura (ANGHINONI e CARLOS, 2018). Esse nutriente tem papel fundamental no estímulo ao crescimento do sistema radicular, favorece o perfilhamento, aumenta o número de espiguetas, a massa de grãos, assim como o número de panículas por m² e a produtividade da cultura (HERNANDES *et al.*, 2010).

Os solos cultivados com esse cereal no Sul do Brasil possuem, em geral, baixos teores de MO o que reduz o potencial de suprimento de N às plantas (DOS SANTOS *et al.*, 2018). Associado a isso, por décadas a maioria das áreas cultivadas com arroz irrigado foram cultivadas no sistema convencional. Soma-se ainda, o alto percentual de áreas cultivadas com arroz que permanecem em pousio no período de outono/inverno, condição propensa a intensificar os processos de perdas de nutrientes e que não contribui para o aumento dos níveis de MOS e suas frações lábeis no solo (MARTINS *et al.*, 2017).

Em solos hidromórficos, há poucas opções de plantas de cobertura e ainda mais restritas são as alternativas de leguminosas hibernais tolerantes ao excesso hídrico (MENEZES *et al.*, 2001). Diversas espécies e famílias de plantas (leguminosas, gramíneas, crucíferas, entre outras) podem ser utilizadas. Porém, entre outros benefícios, as leguminosas podem, principalmente, contribuir para o aumento da ciclagem de nutrientes e aumento do aporte de N (BURESH & DE DATTA, 1991). O trevo persa (*Trifolium resupinatum* L.) tem demonstrado ser uma leguminosa anual de ampla adaptação aos solos terras baixas, especialmente pela sua tolerância ao excesso hídrico e pela sua precocidade de desenvolvimento. Recentemente, tem-se observado o cultivo dessa espécie em áreas de arroz irrigado (SCIVITTARO *et al.*, 2007; GARCIA, 2020). Contudo, ainda há lacunas no conhecimento acerca dos benefícios e do manejo de trevo persa em relação ao aporte de N ao solo, taxa de liberação de nutrientes, desenvolvimento e nutrição de plantas de arroz e os reflexos em produtividade

e qualidade de grãos de arroz cultivado em sucessão a essa forrageira. Essas lacunas científicas e técnicas são grandes em razão da peculiaridade do cultivo de arroz que é conduzido, em boa parte, sob alagamento. O sistema de irrigação, inibe a difusão de oxigênio ao solo e impacta em inúmeras alterações principalmente no metabolismo microbiano que passa a ser predominantemente anaeróbico (CAMARGO *et al.*, 1997). Sob condição de hipóxia, as taxas de mineralização de resíduos vegetais, em geral, são mais lentas o que pode modificar a velocidade de mineralização da leguminosa hiberna e afetar o suprimento de N e outros nutrientes às plantas de arroz (CARLOS *et al.*, 2020). Trabalhos como o de GARCIA (2020), têm mostrado os efeitos benéficos da utilização do trevo persa na sucessão/rotação de culturas em terras baixas, sendo esses benefícios refletidos na produtividade dos cultivos de arroz em sucessão.

Assim, a hipótese do trabalho é de que o cultivo hiberna de trevo persa aumenta a disponibilidade de N mineral e microbiano no solo e aumenta a nutrição da cultura do arroz com impacto em maior produtividade e menor necessidade de adubação nitrogenada. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar o teor de N mineral no solo, o carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, as doses de máxima eficiência econômica (DMEE) de nitrogênio

5.2 Material e métodos

5.2.1 Histórico da área, tratamentos e manejo do solo

O experimento foi conduzido nos anos agrícolas 2018/19 e 2019/20, em condições de campo na Granjas 4 Irmãos localizada em Rio Grande, RS, Brasil. O solo do local é classificado como Planossolo Háptico com relevo suave ondulado (STRECK *et al.*, 2018). As áreas experimentais foram instaladas em dois locais e safras diferentes: em 2018/19 (latitude 32° 9'54.00" sul e longitude 52°24'18.13" oeste) e em 2019/20 (latitude 32°17'34.46" sul e longitude 52°30'54.61" oeste).

Os tratamentos foram dispostos em um fatorial 2x4, onde: o fator 1 consistiu de duas coberturas no período outono/inverno: trevo persa e pousio.

No pousio, foi realizado o controle do trevo persa no início do estabelecimento da lavoura através do corte e retirada dos restos vegetais, e posterior manejo químico das parcelas para que não houvesse estabelecimento de plantas espontâneas e de trevo persa. O fator 2 foi composto de 4 doses de N: 0, 60, 120 e 180 kg N ha⁻¹. O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso com 4 repetições (Figura 1). Os locais onde foram instalados os experimentos eram provenientes de preparo de verão, sem cultivo de culturas de grãos, que consistiu em uma operação de grade aradora e duas operações de grade niveladora, para posterior entaipamento da área. No ano agrícola 2018/2019, os atributos químicos do solo eram: 1,2% de MO (digestão úmida), 10 mg dm⁻³ de P (Mehlich 1), 68 mg dm⁻³ de K (Mehlich 1), CTC_{pH7,0} de 7,2 e 20% de argila na camada de 0-20 cm (método do densímetro). No ano agrícola 2019/2020 a caracterização química do solo foi de 1,4% de MO (digestão úmida), 12 mg dm⁻³ de P (Mehlich 1), 72 mg dm⁻³ de K (Mehlich 1), CTC_{pH7,0} de 8,4 e 22% de argila (método do densímetro) na respectiva camada.

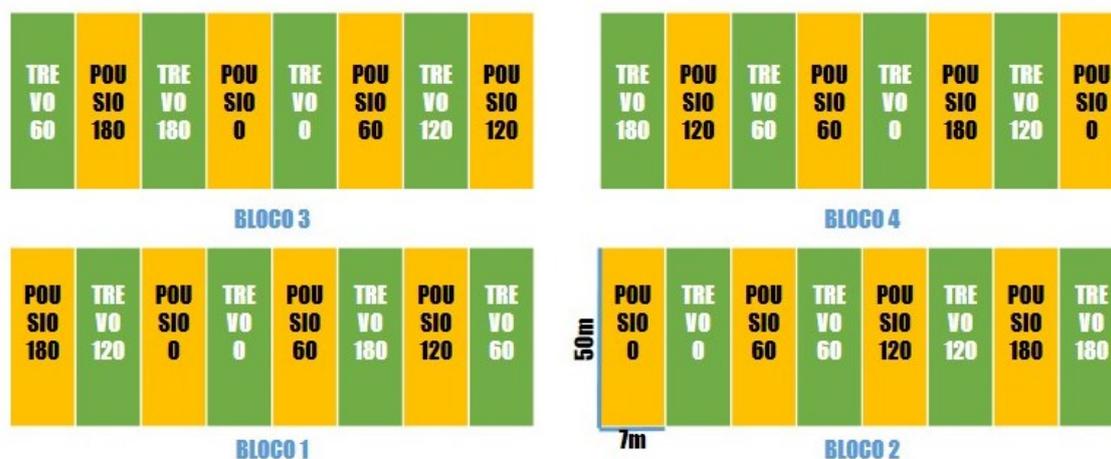


Figura 1. Distribuição das unidades experimentais no campo, ano agrícola 2018/2019. Granja 4 Irmãos, Rio Grande-RS.

A semeadura do trevo persa ocorreu logo após o preparo da área, em linhas espaçadas de 0,17m, na densidade de 4,5 kg ha⁻¹ de sementes, com aplicação de 74 kg de P₂O₅ ha⁻¹. No primeiro ano, a semeadura ocorreu em 12 de abril de 2018 e no segundo ano, em 08 de março de 2019. Nas parcelas em pousio, foi realizado o controle das plantas invasoras na segunda quinzena de maio nos dois anos, com herbicida de ação total. As unidades experimentais consistiram de parcelas com 7 m de largura x 50 m de comprimento (Figura 2) em 2018/2019 e com 3 m de largura x 8 m de comprimento em 2019/20. Aos 40

e 20 dias antes da semeadura do arroz foram realizados dois manejos químicos: o primeiro com glifosato + 2,4 D e o segundo com glifosato + metsulfurom metílico, respectivamente, nos dois anos agrícolas. Foi semeado o híbrido XP 113 da Ricetec, na densidade de 45 kg de sementes ha⁻¹, com espaçamento de 17 cm entre linhas. A semeadura do arroz no primeiro ano agrícola ocorreu no dia 05/10/2018 e no segundo no dia 09/10/2019. A adubação da cultura do arroz foi estabelecida com base nos resultados da análise do solo e baseadas nos critérios estabelecidos conforme SOSBAI (2016), consistindo na aplicação de adubação de base de 70 e 114 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O, respectivamente, nos dois anos agrícolas. A ureia foi o fertilizante nitrogenado utilizado em cobertura para o arroz irrigado, parcelado em duas aplicações, dois terços no estágio V₃ e um terço no estágio R₀ (SOSBAI, 2018). A produtividade foi quantificada pela colheita de uma área útil de 2 m x 2 m em cada parcela, realizadas nos dias 06/03/2019 e 06/03/2020. Após a colheita, as amostras foram devidamente identificadas e submetidas à trilhagem para posterior determinação de impureza e umidade, que foram utilizadas para o cálculo de produtividade a 13% de umidade.



Figura 2. Imagem aérea do experimento a campo do ano agrícola 2018/2019, com parcelas sob cultivo de trevo persa e pousio. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS.

5.2.2 Evolução do crescimento do trevo persa

Para determinação da quantidade de MS, foi utilizado um amostrador de madeira e coletado toda parte aérea do trevo persa em uma área de 0,5m x 0,5m (Figura 3). As amostragens foram realizadas em 4 épocas no ano de 2018 (04/07, 20/07, 03/08 e 17/08) e 5 épocas em 2019 (30/05, 27/06, 07/08, 21/08 e 03/09). Em cada parcela foram realizadas 4 amostragens de 0,25 m² por data de coleta. O material foi identificado no campo e seco em estufa a 65°C por 3 dias até manter o peso constante e posteriormente pesado para determinação da massa da MS em Mg ha⁻¹.



Figura 3. Coleta de trevo persa para determinação da matéria seca. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS.

5.2.3 Amostragem de solo e determinação do nitrogênio mineral

Para determinação do N mineral no solo, 4 subamostras foram coletadas em cada unidade experimental nas 4 doses de N (0, 60, 120 e 180 kg N ha⁻¹), totalizando 8 subamostras por bloco, na camada de 0–5 cm espaçadas temporalmente em cerca de 14 dias após o manejo químico do trevo persa até o estágio R₄ do arroz irrigado. Após a primeira adubação nitrogenada de cobertura, as coletas de solo foram realizadas somente nas parcelas com pousio e trevo persa na dose de 0 kg N ha⁻¹. Essa amostragem teve o objetivo de monitorar somente o N mineral proveniente da leguminosa hiberna sem

influência do N proveniente da ureia utilizada na adubação nitrogenada. As amostras foram coletadas com auxílio de um trado calador, onde foi removido o material orgânico da superfície do solo em decomposição. Posteriormente, foram homogeneizadas em um balde para a constituição de uma amostra composta de solo por parcela. As amostras de solo foram colocadas em sacos identificados e imediatamente armazenadas em temperatura refrigerada ($\leq 4^{\circ}\text{C}$) até o momento da análise. Previamente às análises, as amostras de solo foram tamisadas em peneira de 2 mm para a determinação dos teores de N mineral. O NH_4^+ e o NO_3^- foram extraídos com cloreto de potássio (KCl) 1 mol L^{-1} e determinados pelo método de destilação *Kjeldahl* (TEDESCO *et al.*, 1995). Parte do solo foi pesado e seco por 24h a uma temperatura de 105°C , para determinar a umidade e posterior correção dos teores de N mineral na condição de solo seco.

5.2.4 Amostragem de solo e determinação do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana

A coleta de solo para a determinação do C e N microbiano ocorreu somente na camada de 0-5 cm, pois essa camada é mais sensível às mudanças na biomassa microbiana do solo em relação ao manejo. Essa coleta foi realizada e determinada a umidade do solo conforme o item 5.2.3, com armazenamento sob refrigeração a 5°C e analisado em até 20 dias.

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi analisado conforme método descrito por Ferreira *et al.* (1999), onde a ação do clorofórmio é substituída por um forno de micro-ondas para eliminação dos microrganismos. Foram pesadas duas amostras de 32 g de solo, e acondicionadas em frascos snap-caps de 90 mL, sendo que uma das amostras passou pelo processo de irradiação da microbiota pela esterilização no micro-ondas por 4 minutos, sendo: 2 minutos de irradiação, que logo após a retirada foram colocadas por 2 minutos em um frasco com água e gelo, esse processo foi realizado duas vezes por amostra. Tanto nas amostras irradiadas como as não irradiadas, foram adicionados 40 mL de solução de sulfato de potássio (K_2SO_4) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ para extração do CBM. As amostras foram agitadas em um agitador horizontal por 20 minutos na velocidade de 150 rotações por minuto (rpm). Após esse processo as amostras foram centrifugadas por 3 minutos à uma velocidade de 3000 (rpm). Posteriormente

retirou-se uma alíquota de 25 mL para determinação do C orgânico conforme metodologia descrita por Tedesco *et al.* (1995). Foi utilizada a Equação 1 para determinar o teor de C da biomassa microbiana do solo:

$$CM = \frac{Ci - Cni}{Kc} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

CM: teor de carbono da biomassa microbiana do solo (mg kg^{-1});

Ci: teor de carbono da amostra irradiada (mg kg^{-1});

Cni: teor de carbono da amostra não irradiada (mg kg^{-1});

Kc: 0,33 fator de correção proposto por Sparling & West (1988).

Os teores do nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) também foram determinados pelo método de irradiação-extração, conforme sugerido por Ferreira *et al.* (1999). Neste caso, foram pesadas amostras com 20 g de solo, seguindo o mesmo protocolo (irradiado e não irradiado). Todas as amostras receberam 50 mL de solução de K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, para extração do NBM e colocadas para agitar em um agitador horizontal por 30 min a 150 rpm. Após esse processo todas as amostras foram centrifugadas por 3 min à uma velocidade de 3000 rpm. A determinação do NBM foi de acordo com Brookes *et al.* (1985). Foi utilizada uma alíquota de 20 mL do extrato dessas amostras que foi transferida para um tubo de digestão e adicionado mais 3 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado e de 1 g de mistura catalítica ($\text{K}_2\text{SO}_4:\text{CuSO}_4:\text{Se}$ em pó, na relação 1:0,1:0,01). Os tubos foram acondicionados no bloco digestor onde permaneceram das 18 h até as 8 h do dia seguinte com a temperatura de 80°C (pré-digestão), em seguida a temperatura foi aumentada e mantida a 150 e 300°C por 1:30 h e 3:00 h respectivamente. Após, todos os tubos foram completados com água destilada até chegar no volume de 20 mL, para determinação do NBM pelo método de *Kjeldahl*. A destilação foi realizada adicionando 20 mL de NaOH 10 mol L^{-1} , recolhendo o destilado em um erlenmeyer de 50 mL contendo 10 mL de ácido bórico (H_3BO_3). A titulação foi procedida com H_2SO_4 $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$. O N microbiano foi calculado de acordo com a equação (2):

$$NM = (Ni - Nni) \times Kn \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

NM: teor de nitrogênio da biomassa microbiana do solo (mg kg^{-1});

Ni: teor de nitrogênio da amostra irradiada (mg kg^{-1});

Nni: teor de nitrogênio da amostra não irradiada (mg kg^{-1});

Kn: 0,54 fator de correção proposto por Brookes *et al.* (1985).

5.2.5 Avaliações de componentes de rendimento de plantas de arroz

No estágio R₄, foi feita a avaliação do número de panículas por m², amostrando quatro linhas aleatórias de 1 metro linear por parcela. Nesse mesmo estágio, foi determinada a estatura do estande de plantas de arroz, pela amostragem de 4 plantas representativas por parcela. A determinação da estatura foi realizada com auxílio de uma trena, onde foi feita uma medição para cada planta.

5.2.6 Atributos fisiológicos

A coleta dos dados fisiológicos (clorofila, flavonóides, antocianinas e índice de balanço de nitrogênio) foram realizadas no estágio R₂, através de leituras realizadas no terço médio da folha bandeira. As determinações foram feitas com a utilização de um clorofilômetro (modelo Dualex FORCE-A, Orsay, France), a partir da média das leituras de 8 plantas por parcela.

5.2.7. Doses de nitrogênio de máxima eficiência técnica e econômica

Para a dose de máxima eficiência técnica (DMET) e dose de máxima eficiência econômica (DMEE) foram utilizadas as derivadas das equações quadráticas de curva de resposta à adução nitrogenada em sucessão ao pousio e ao trevo persa. Para o cálculo da DMEE e DMET, foi usado o preço do arroz a R\$ 0,80 por kg e a ureia a R\$ 1,49 por kg com 45% de N nos anos agrícolas

2018/2019 e 2019/2020 respectivamente, e dessa forma, o custo de N usado nos cálculos da DMEE foi de R\$ 3,31 por kg. Os valores econômicos do fertilizante nitrogenado e do produto, grãos de arroz em casca, foram utilizadas as médias do RS nos respectivos anos agrícolas.

DMET = dose de nitrogênio para a máxima produção ($dy/dx = 0$)

DMEE = dose de nitrogênio para o máximo lucro ($dy/dx = Px/Py$)

onde:

dy/dx = derivada da equação quadrática de resposta à adubação nitrogenada

Px = preço do nitrogênio na forma de ureia

Py = preço do arroz (grãos em casca)

5.2.7 Análise estatística

Os dados foram submetidos à avaliação de normalidade pelo método de Shapiro-Wilk. Obedecendo aos pressupostos de distribuição normal, as variáveis estudadas foram submetidas à análise bifatorial, sendo o fator A as coberturas de outono inverno, trevo persa e pousio e o fator B as doses crescentes de N aplicadas em cobertura para os atributos fisiológicos e de produtividade de grãos. Posteriormente os dados foram submetidos a análise de regressão quadrática em função das doses crescentes de N ($p < 0,05$). Os dados de nitrogênio mineral e carbono e nitrogênio da biomassa microbiana foram submetidos à análise de variância (ANOVA) de medidas repetidas ao tempo ($p < 0,05$) As análises estatísticas foram realizadas com suporte dos programas estatístico R e SPSS 24.

5.3 Resultados

5.3.1 Crescimento do trevo persa

A massa de matéria seca (MMS) produzida pelo trevo persa foi maior no ano agrícola de 2019, variando de 1,15 Mg ha⁻¹ na primeira coleta (30/05/2019) a 5,49 Mg ha⁻¹ na última coleta (03/09/2019), em relação ao ano agrícola de 2018

que variou de 1,18 Mg ha⁻¹ na primeira coleta (04/07/18) a 2,39 Mg ha⁻¹ na última coleta (17/08/2018) (Figura 4). Na comparação da produção de MMS ao final do ciclo, observa-se uma produção de cerca de 130% superior em 2019 comparado a 2018. Essa diferença fica clara quando observa-se aos 60 dias após 1 de maio, onde verificou-se em 2018 uma produção de 1,20 Mg ha⁻¹, enquanto que em 2019, no mesmo período uma produção de cerca de 3,70 Mg ha⁻¹ (Figura 4).

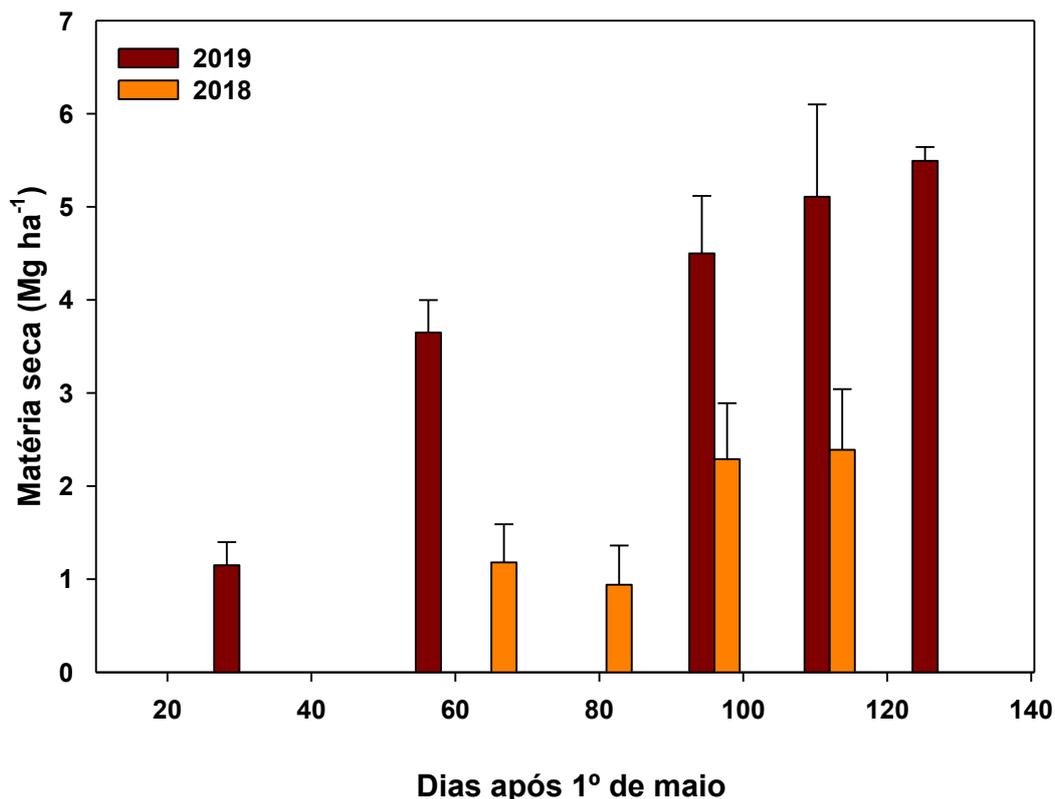


Figura 4: Massa de matéria seca de trevo persa cultivar Lightning cultivado em Planossolo no período de outono inverno dos anos de 2018 e 2019. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS.

5.3.2 Nitrogênio mineral do solo

O cultivo de trevo persa, no período outono/inverno, apresentou incremento no teor de N mineral do solo, e teve impacto ($p < 0,05$) na maioria das coletas nos 2 anos agrícolas em relação ao tratamento pousio (Figura 5). Também propiciou maiores teores de N mineral a partir do início do mês de setembro até a primeira quinzena de novembro, demonstrando a mesma tendência nos dois anos agrícolas. Observou-se também, nos dois anos agrícolas, que o tratamento sob cultivo de trevo persa apresentou maiores teores de N mineral do solo, em

praticamente todas as coletas. Em 2018, das 13 avaliações, 9 apresentaram teores de N mineral superior ($p < 0,05$) ao pousio. Em 2019, 6 datas de coleta apresentaram teores de N mineral superiores ($p < 0,05$) de um total de 10 datas de avaliação. Nesse sentido, na média dos dois anos agrícolas, em 65% das datas de avaliação o teor de N mineral foi superior quando houve o cultivo da leguminosa hiberna no período de outono/inverno.

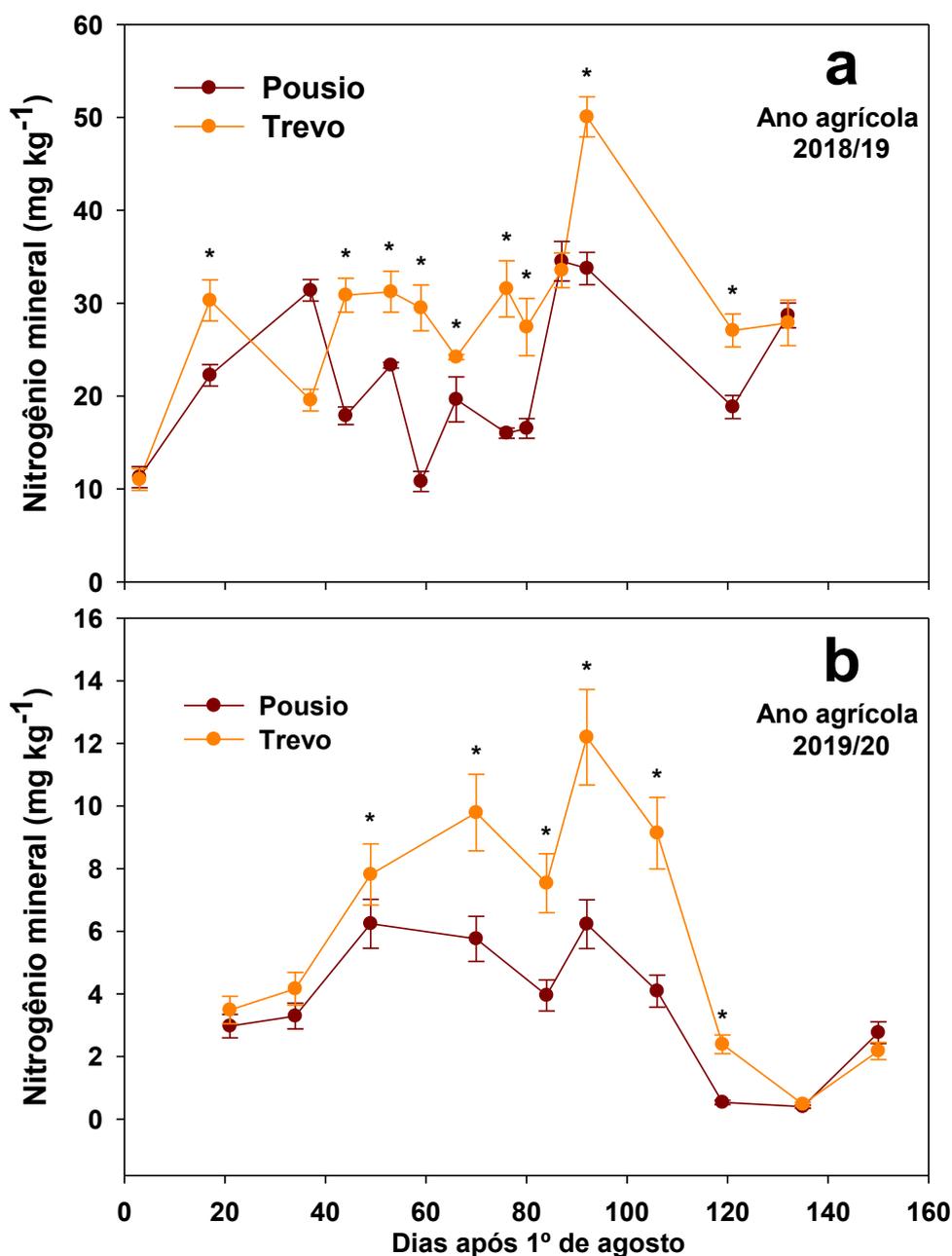


Figura 5. Teores de nitrogênio mineral (amônio e nitrato) trocáveis sob cultivo de trevo persa e pousio em Planossolo após o período de manejo químico até o período vegetativo da cultura do arroz irrigado nos anos agrícolas 2018/2019 (a) e 2019/2020 (b), camada de 0-5 cm. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. *($p < 0,05$).

5.3.3 Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana

O cultivo de trevo persa no ano agrícola 2019/2020, aumentou o teor do CBM nas duas primeiras e na última coleta, nas demais coletas apresentou teores semelhantes (Figura 6a). Por outro lado, não influenciou ($p < 0,05$) o NBM em comparação ao sistema de pousio no ano agrícola 2019/2020 (Figura 6b) apresentando teores semelhantes entre todos os tratamentos.

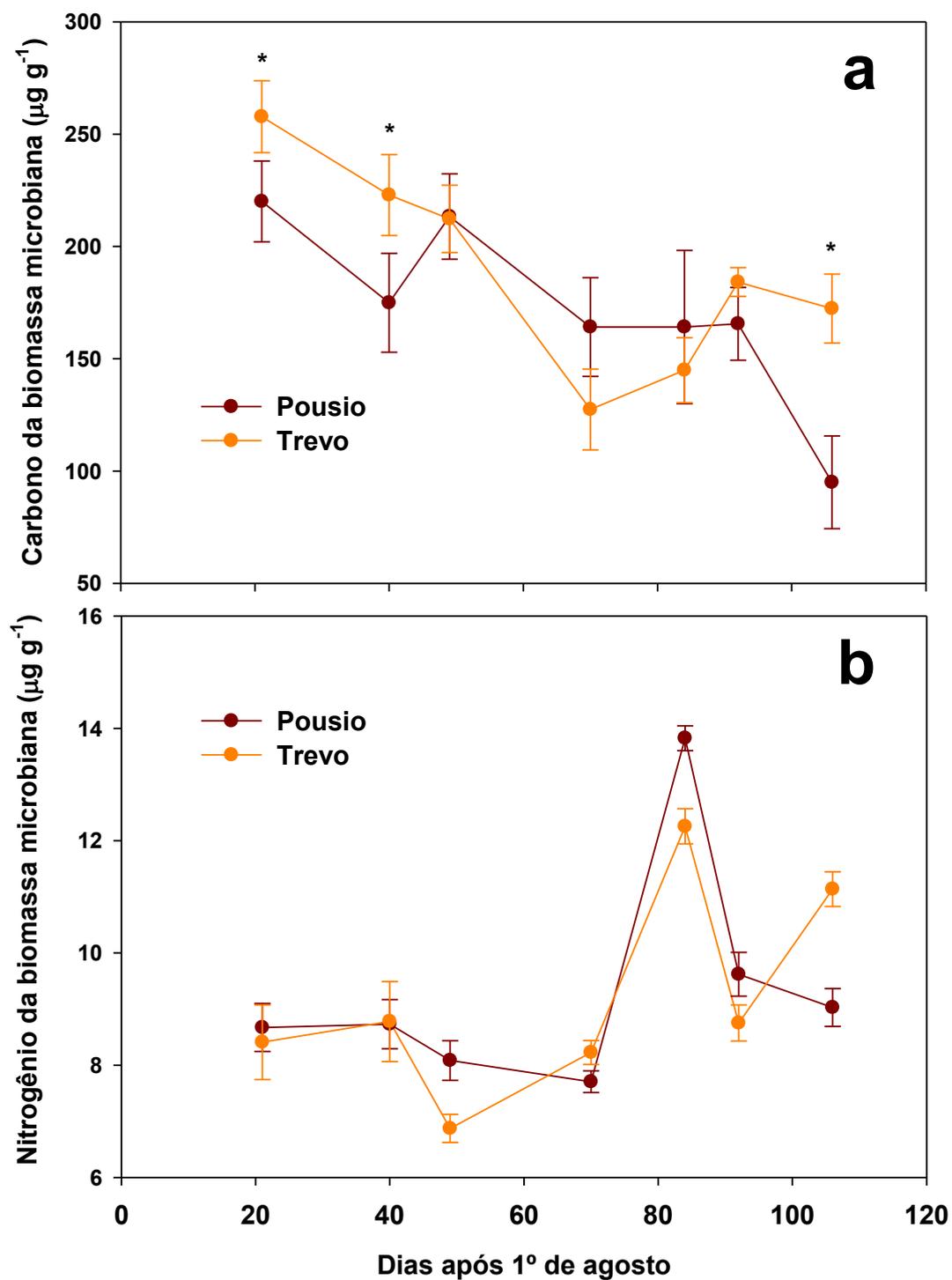


Figura 6: Teores de carbono da biomassa microbiana (a) e nitrogênio da biomassa microbiana (b) em Planossolo sob cultivado com trevo persa e pousio no período de outono inverno com estabelecimento de arroz irrigado em sucessão. Ano agrícola 2019/20. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. * ($p < 0,05$).

5.3.4 Estatura e número de panículas do arroz irrigado

As parcelas com trevo persa e pousio não apresentaram diferença ($p < 0,05$) para estatura de plantas (Figura 7a) e para número de panículas por área (Figura 7b). Contudo, há um aumento no número de panículas à medida que há incremento no aumento das doses de N.

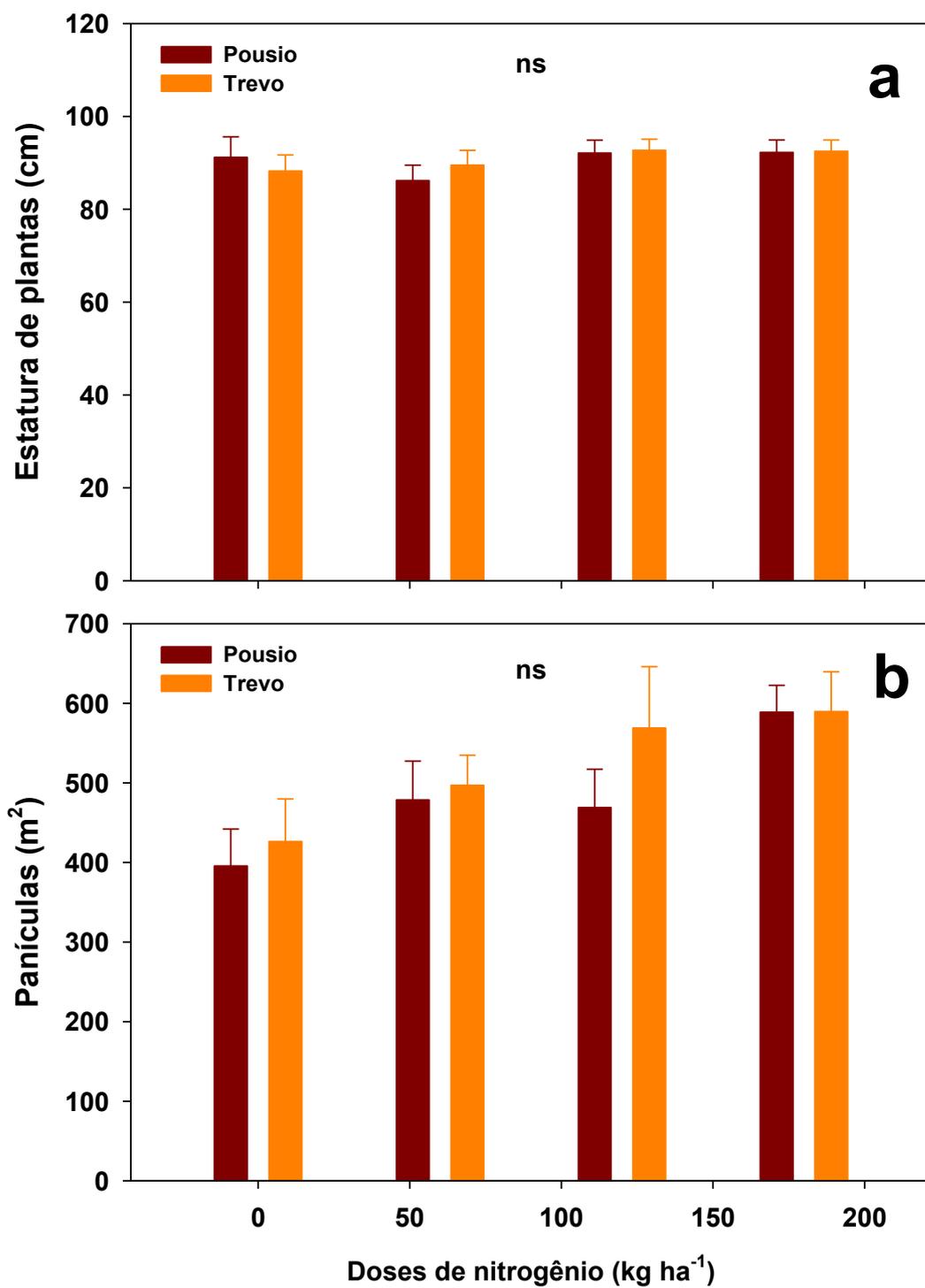


Figura 7. Estatura e panículas de arroz irrigado em sucessão a trevo persa sob doses crescentes de nitrogênio. Híbrido XP 113. Ano agrícola 2018/19. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. ns: não diferiu estatisticamente.

5.3.5 Atributos fisiológicos do arroz irrigado

Na presença do trevo persa os índices de clorofila e balanço de N nas folhas de arroz foram maiores, em praticamente todas as doses de N em relação ao tratamento pousio (Figura 8 a, 8 b). Contudo, nas menores doses de N esse efeito foi mais evidente que também ocorreu nos índices de antocianinas e flavonoides que apresentaram teores menores nas parcelas com trevo persa nas menores doses de N (Figura 8 c, 8 d). Houve maiores valores nos índices de clorofila e balanço de N e menores nos índices de antocianinas e flavonoides, com o aumento das doses de N, independentemente do manejo hibernal.

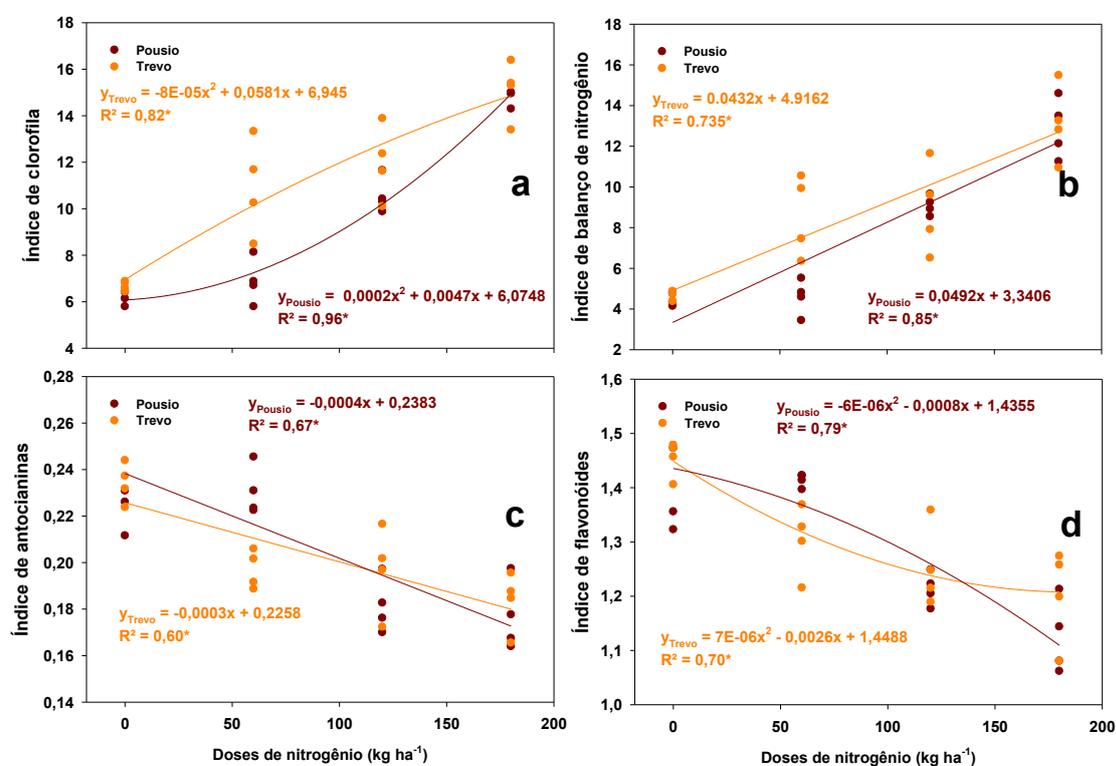


Figura 8. Índice de clorofila (a), balanço de nitrogênio (b), antocianinas (c) e flavonoides (d) em folhas de arroz irrigado cultivado em sucessão a trevo persa sob doses crescentes de nitrogênio. Híbrido XP 113. Ano agrícola 2018/19. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. * ($p < 0,05$).

As maiores produtividades de arroz ocorreram no índice de clorofila na faixa de 10 a 18 (Figura 9a). O mesmo ocorreu para o índice de balanço de N (Figura 9b). Nos índices de antocianinas e flavonoides a maior produtividade do arroz ocorreu nos menores valores dos índices (Figura 9 c, 9 d).

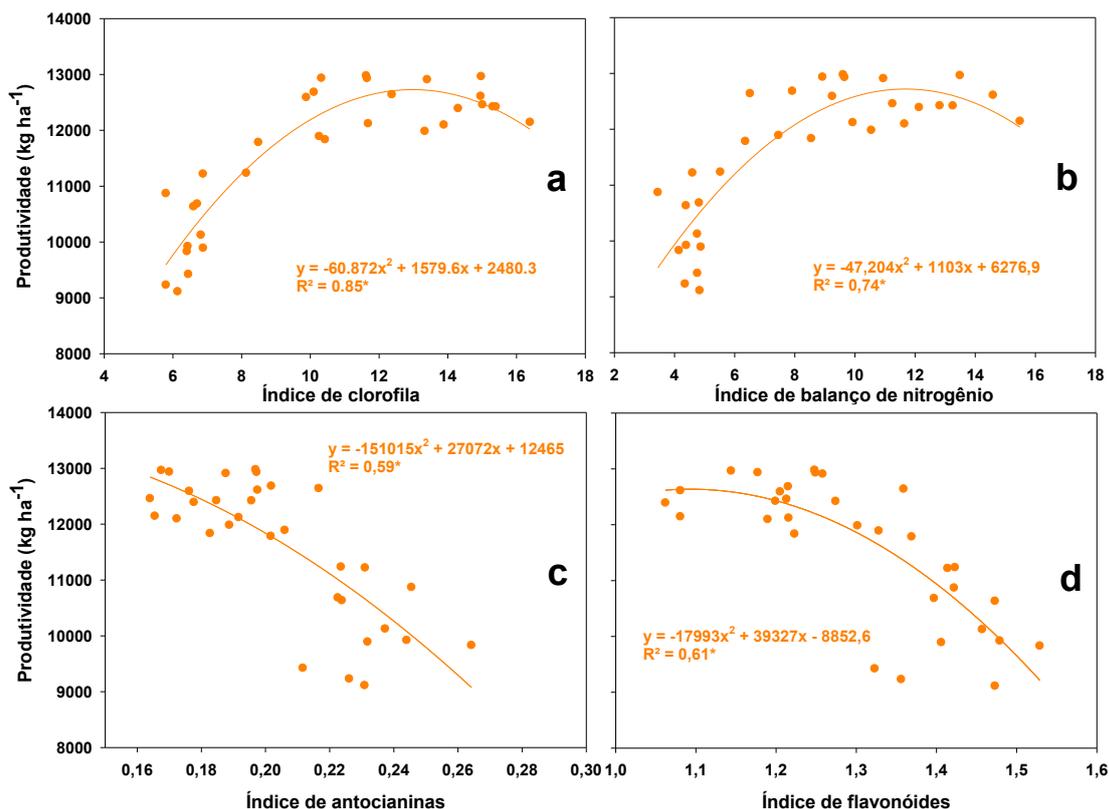


Figura 9. Relação de índice de clorofila (a), balanço de nitrogênio (b), antocianinas (c) e flavonoides (d) com produtividade de arroz irrigado cultivado em sucessão a trevo persa sob doses crescentes de nitrogênio. Híbrido XP 113. Ano agrícola 2018/19. Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS. * ($p < 0,05$).

5.3.6 Produtividade e doses de máxima eficiência técnica e econômica no arroz irrigado

Nos dois anos agrícolas, o cultivo do trevo persa utilizado como cobertura de solo, para o plantio do arroz irrigado em sucessão, elevou a produtividade nas doses de 0 e 60 kg N ha⁻¹ em relação ao tratamento pousio com a mesma dose de adubação nitrogenada. Já nas doses mais elevadas, 120 e 180 kg N ha⁻¹ as produtividades de grãos foram similares (Figura 10 a, 10 b). No ano agrícola de 2018/2019, a amplitude de produtividade independentemente da cobertura hiberna foi menor de que no ano agrícola 2019/2020. Em 2018/2019 os tratamentos sem adição de N tiveram produtividade de entre 9 e 10 Mg ha⁻¹ atingindo patamares inferiores de cerca de 13 Mg ha⁻¹ nas doses de N mais altas (180 kg N ha⁻¹). No ano agrícola de 2019/2020, os tratamentos controle tiveram

produtividades entre 7 e 8 Mg ha⁻¹ e nas doses mais altas de N (180 kg N ha⁻¹) produtividades próximas de 14 Mg ha⁻¹ (Figura 10 b).

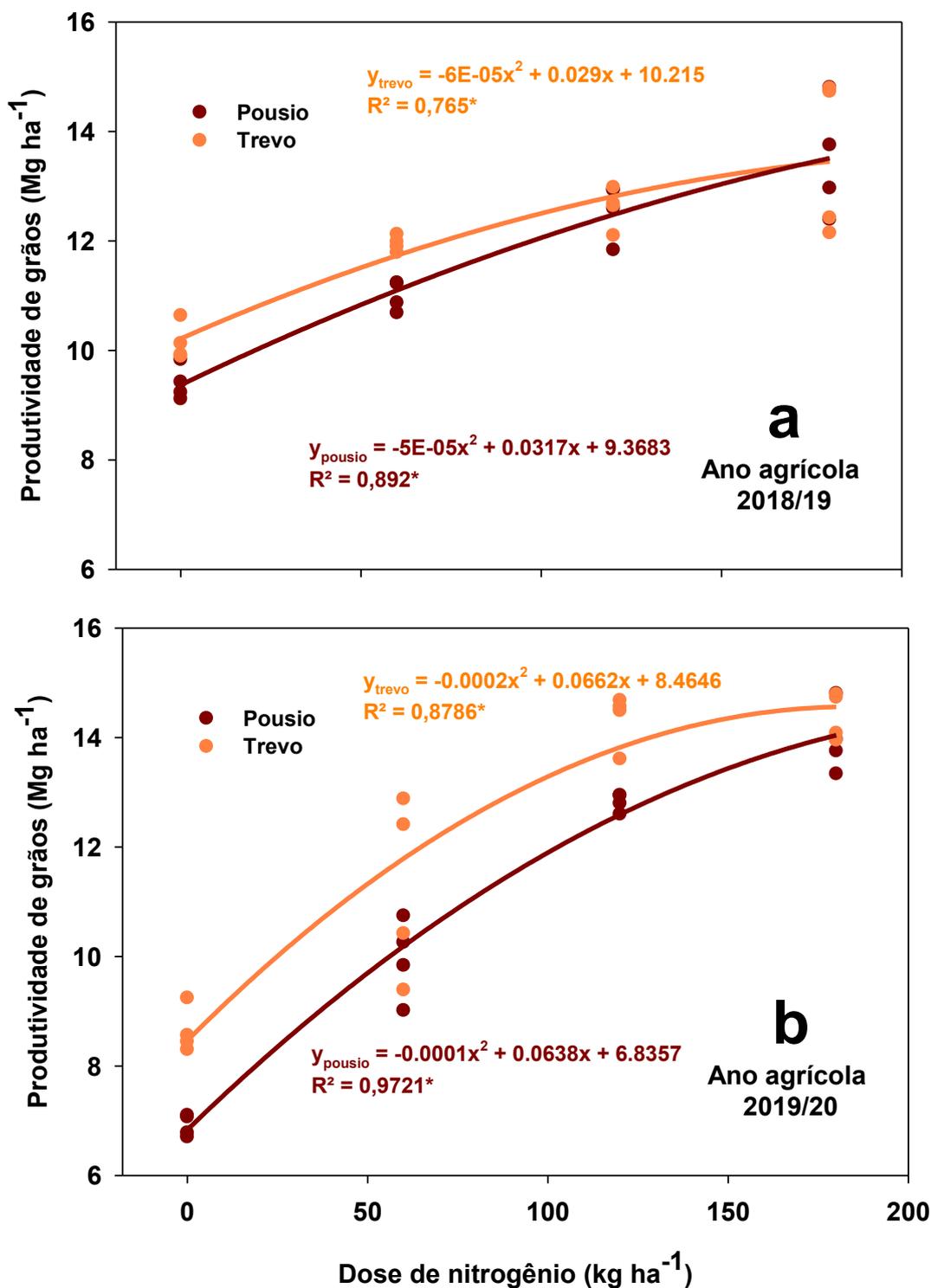


Figura 10. Produtividade de arroz irrigação em sucessão a trevo persa sob doses crescentes de nitrogênio. Híbrido XP 113. Anos agrícolas 2018/19 (a) e 2019/20 (b). Granja 4 Irmãos, Rio Grande-RS. * ($p < 0,05$).

A dose de máxima eficiência econômica (DMEE) apresentou variação nos dois anos agrícolas (Tabela1), de 122 a 173 kg N ha⁻¹ nos tratamentos com trevo e 157 a 226 kg N ha⁻¹ nas parcelas de pousio nos anos agrícolas 2018/2019 e 2019/2020, respectivamente. A dose de máxima eficiência técnica (DMET) também apresentou variações para o N aplicado nos anos agrícolas 2018/2019 e 2019/2020 (Tabela 1), variando de 138 a 184 no tratamento trevo persa, e de 176 a 241 kg N ha⁻¹ no tratamento pousio, respectivamente. Apesar das variações, a DMEE nos dois anos agrícolas, apresentou redução de 23% da dose de N no tratamento com trevo persa em relação ao tratamento pousio.

Tabela 1. Doses de máxima eficiência técnica e econômica de adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado em sucessão a trevo persa e pousio. Híbrido XP 113, anos agrícolas 2018/19 e 2019/20, Granjas 4 Irmãos, Rio Grande-RS.

Ano agrícola	2018/19	2019/20
Tratamento	Pousio	Pousio
DMET (kg N ha ⁻¹)	175	241
DMEE (kg N ha ⁻¹)	156	225
Tratamento	Trevo	Trevo
DMET (kg N ha ⁻¹)	137	184
DMEE (kg N ha ⁻¹)	122	172

5.4 Discussão

5.4.1 Crescimento do trevo persa

Para uma melhor implantação e uma grande produção de MS de culturas de cobertura, a semeadura deve ocorrer na época mais adequada. Essa condição, proporciona um rápido desenvolvimento da cultura associado a uma menor probabilidade de ocorrência de condições adversas (CARÁMBULA, 2003). A antecipação de aproximadamente 30 dias da semeadura do trevo persa no ano de 2019 em relação ao ano de 2018, aumentou a produção de MS em 3,10 Mg ha⁻¹. Esse fato ocorreu porque as plantas tiveram um período mais amplo de desenvolvimento e em condições mais adequadas para expressar o seu potencial produtivo (DUARTE *et al.*, 2015). No ano de 2019, com a antecipação da semeadura, as plântulas do trevo persa tiveram um crescimento

inicial rápido, devido às condições ambientais mais favoráveis de temperatura, além de terem 30 dias a mais para o seu desenvolvimento do que as plantas do ano anterior. Esse maior período de estabelecimento propicia maior tempo para promover a FBN e ciclagem de nutrientes. Outro fator de grande relevância é que a semeadura antecipada, em 2019, possibilitou ao trevo maior produção de biomassa e uma melhor resistência às condições adversas de baixa temperatura e excesso hídrico que, frequentemente, nos meses de junho e julho, afetam bastante as plantas em fase mais inicial.

A maior produção de biomassa ocorrida no ano de 2019 foi importante sob a ótica de disponibilização de N e, possivelmente, de outros nutrientes à cultura do arroz irrigado. Contudo, em algumas situações, a alta quantidade de biomassa de culturas hibernais associada a um período curto entre o manejo químico e a semeadura do arroz e com alta incidência e volume de chuva pode culminar na produção de ácidos orgânicos como o acético e o propiônico que são prejudiciais as plântulas de arroz e podem ter impactos no desenvolvimento da planta e produtividade de grãos. Esses compostos são produzidos como subprodutos da fermentação de resíduos vegetais que ocorre em condições de hipoxia (SOUSA, 2001).

5.4.2 Nitrogênio mineral do solo

O cultivo da leguminosa hiberna propiciou, na maioria das avaliações, maior disponibilidade de N mineral no solo (figura 5 a, b). Por ser uma leguminosa com alta concentração de aminoácidos e proteínas, o que confere uma baixa relação C:N, o trevo persa colabora diretamente para o aumento do teor de N mineral no solo. Essa contribuição no aporte de N, resulta da rápida decomposição e mineralização dos resíduos orgânicos da parte aérea e das raízes (PEOPLES, *et al.*, 2019). Acrescenta-se a isso o fato de que o N acumulado na parte aérea ser, em sua maior parte, resultado da FBN nos nódulos das raízes, devido sua capacidade de estabelecer simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium* que possuem alto potencial de fixar o N₂ atmosférico, fornecendo assim N para a planta (GUINET *et al.*, 2018).

Esse N mineral fornecido, é um suprimento importante para a cultura estabelecida posterior a essa leguminosa. Pode-se observar que a maior taxa

de liberação de N ocorreu desde o início de setembro até a primeira quinzena de novembro, aproximadamente 30 a 40 dias após o manejo químico total da área. Essa dinâmica de liberação demonstra que a taxa de mineralização de N em solos alagados pode ser mais lenta comparada a solos de condição de sequeiro (ACOSTA *et al.*, 2014). Nesse sentido, uma mineralização mais lenta de resíduos do trevo sob alagamento pode contribuir para um maior sincronismo com a demanda da cultura do arroz em estádios mais avançados do período vegetativo, que é uma fase de ampla absorção de N.

Estudos (CAI *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2020) demonstram a importância do cultivo de diferentes espécies leguminosas, trazendo inúmeros benefícios ao sistema de produção, diminuindo a erosão, aumento na disponibilidade de N mineral, além de aumentar o rendimento das culturas cultivadas em sucessão, podendo diminuir a necessidade das doses da adubação nitrogenada, sem que haja perda de produtividade. Como o trevo possui uma baixa relação C:N, possivelmente o manejo químico do trevo persa não pode ser muito distante da época de semeadura do arroz em razão da rápida mineralização do resíduo dessa leguminosa hiberna.

Em trabalho conduzido por Garcia (2020), em um sistema de sucessão trevo persa e arroz irrigado, houve maiores teores de N mineral na solução do solo durante todo o ciclo do arroz nas parcelas cultivadas com trevo persa/plantio direto em comparação aos tratamentos pousio/preparo de solo. Em trabalho semelhante, com leguminosas hibernais (ZHAO *et al.*, 2015) obtiveram redução de 50% do fertilizante nitrogenado quando da incorporação dos resíduos de leguminosas hibernais, em substituição ao trigo no inverno.

5.4.3 Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana

A adoção de coberturas de solo usando leguminosas hibernais é um dos fatores que afetam a biomassa microbiana do solo (CARLOS *et al.*, 2020). O maior suprimento de C em formas lábeis como de leguminosas hibernais ricas em aminoácidos e outros compostos de baixo peso molecular contribuem para o aumento dos teores de CBM e NBM (BURNS *et al.*, 2013). Esses compartimentos microbianos podem ser fontes de rápida disponibilização de nutrientes às culturas como no caso do N microbiano (MCDANIEL & GRANDY,

2016). Contudo, o período recente de adoção de somente um ciclo da leguminosa hibernal possivelmente não tenha sido suficiente para modificar esses compartimentos microbianos no solo. Em alguns trabalhos de longo prazo foram verificados aumentos do CBM com cultivo de forrageiras ou adição de restos vegetais na mesma área por mais de 1 ano agrícola (CHEN *et al.*, 2017; CARLOS, 2017). Portanto, os resultados encontrados em nosso experimento podem estar atrelados, principalmente, ao fato de ser uma área de primeiro ano de adoção da leguminosa hibernal. Nesta situação, possivelmente há um maior impacto no N mineral proveniente da mineralização dos resíduos vegetais da parte aérea e do sistema radicular do trevo. Em áreas com o estabelecimento da leguminosa hibernal como cobertura ou sob pastejo por médio e longo prazo, possivelmente, já se observe impactos na fração lábil de N como o aumento do NBM (CARLOS, 2017). Em estudo de coincorporação de palha de arroz e adubação verde (ZHOU *et al.*, 2020) observou o aumento do CBM e NBM nos tratamentos com incorporação de adubação verde (pura ou mista) em relação ao tratamento com somente palha de arroz.

5.4.4 Estatura e número de panículas no arroz irrigado

O tratamento com trevo persa não apresentou efeito para a estatura e o número de panículas do arroz irrigado em relação ao tratamento pousio (Figura 7). O mesmo resultado foi encontrado em relação ao aumento das doses de N para a estatura de plantas de arroz (Figura 7a), porém mesmo não apresentando diferença para o número de panículas (Figura 7b), o aumento nas doses de N impacta diretamente na capacidade de perfilhamento das plantas (SINGH & PILLAI, 1996), especialmente em híbridos, como o XP 113. Esse aumento no número dos perfilhos, tem reflexo direto na maior emissão de panículas, que é um fator essencial para que a planta expresse maior produtividade de grãos.

5.4.5 Atributos fisiológicos

O tratamento com trevo persa apresentou uma tendência no aumento do teor de clorofila e no índice de balanço de N (Figura 8 a, 8 b) nos menores níveis de adubação nitrogenada em relação ao tratamento pousio. Esse

comportamento pode estar relacionado ao N aportado pela leguminosa hiberna ao solo, através da sua parte aérea e FBN, disponibilizando assim mais N para o arroz irrigado cultivado em sucessão. A clorofila é um pigmento de absorção de luz de grande relevância, sendo importante no crescimento e adaptabilidade da planta a ambientes distintos e, assim, definindo a produtividade. O teor de clorofila nas folhas das plantas e o N estão correlacionados, visto que este elemento é constituinte da molécula de clorofila. A influência das doses de N, sobre a clorofila e o balanço interno de N, estão relacionadas ao fato da planta translocar esse elemento para regiões de crescimento ativo, pois se o solo não suprir essa demanda, a planta degrada as moléculas de clorofila e transloca o N das folhas mais velhas para as mais novas.

Os índices de flavonoides e antocianinas (Figura 8 c, 8 d), apresentaram tendência de resultados maiores nos tratamentos de pousio e nas menores doses de N em relação ao tratamento com trevo persa nas mesmas doses, possivelmente pela disponibilidade de N através do trevo. Segundo Demotes-Mainard *et al.*, (2008) flavonoides são metabólitos secundários da classe dos polifenóis, formados quando as plantas crescem sob deficiência de N. Estes pigmentos são indicadores de estresse na planta, portanto seu aumento indica possivelmente a baixa disponibilidade de N.

O aumento nos índices de clorofila e do balanço de N e consequente redução dos índices de flavonoides e antocianinas nos tratamentos com trevo persa podem estar relacionados ao fato dessa planta ser uma leguminosa de baixa relação C:N, que além de realizar a FBN supre em grande quantidade o N às culturas. Essa maior disponibilidade de N no solo nos tratamentos com trevo persa, é de extrema importância pois será assimilado pelas plantas em maiores quantidades, e como é componente da clorofila, aumenta a área foliar da planta, que por sua vez, aumenta a eficiência na interceptação da radiação solar, taxa fotossintética e consequentemente, tem alta influência na produtividade (Figura 9) em grãos. (FAGERIA *et al.*, 2003).

5.4.4 Produtividade e dose de máxima eficiência econômica e técnica no arroz irrigado

Nos anos agrícolas 2018/2019 e 2019/2020, os tratamentos com o trevo persa nas doses de 0 e 60 kg de N ha⁻¹ apresentaram aumento na produtividade de grãos em relação ao tratamento pousio nas mesmas doses (Figura 10 a, 10 b). Este fato deve-se possivelmente ao aporte de N dessa leguminosa hiberna, suprindo o N requerido pelas plantas nas menores doses, onde há maior carência de N. Nas doses de 120 e 180 kg N ha⁻¹ não houve diferença de produtividade do arroz em função do resíduo (Figura 10 a, 10 b), pois nessa condição de doses elevadas de N, este nutriente não é o fator mais limitante para o desenvolvimento da planta e sim o potencial genético do híbrido.

No trabalho de Lima et al. (2020), com 4 genótipos de arroz, o híbrido XP 113 apresentou maiores produtividades nas doses de 106 e 142 kg N ha⁻¹ nas cidades de Triunfo (2017/2018) e Capivari do Sul (2018/2019) respectivamente.

Estudos realizados na região de Pelotas, em um Planossolo Háplico, demonstraram a importância da utilização de *Trifolium resupinatum* sp. cultivado como planta de cobertura antecessora à cultura do arroz irrigado (REIS, 2007). Neste trabalho, observou-se que o cultivo hiberna de trevo persa apresentou a mesma produtividade em relação ao tratamento que recebeu 100 kg de ureia ha⁻¹ (45 kg N ha⁻¹) em cobertura sob pousio. Scivittaro et al. (2007) avaliaram o uso de diferentes coberturas como fonte de N para a produção de arroz orgânico, e observaram que os tratamentos com utilização do trevo persa obtiveram a mesma produtividade ao trevo alexandrino (*Trifolium alexandrinum*) com produtividade de 7.19 e 6.36 Mg ha⁻¹ de arroz, respectivamente, sem adição de adubo nitrogenado de cobertura.

A redução de 23% na DMEE do N na cultura do arroz em sucessão ao trevo persa (Tabela 1) é um resultado relevante, sob o ponto de vista econômico, pois é uma alternativa para a redução de custos de produção. Também é uma estratégia importante de produção mais sustentável, visto que altas doses de N podem causar impactos negativos no ambiente, em razão do alto potencial de sua contaminação em mananciais hídricos e o alto custo energético no processo industrial de produção da ureia. Em trabalho realizado em um Planossolo com 3 leguminosas hibernas, Scivittaro et al., (2005) apresentaram resultados de aumentos de 19 a 28% na quantidade total de N acumulado pela cultura do arroz irrigado cultivado em sucessão. Naher et al. (2020) em seu trabalho com arroz irrigado cultivado em sucessão a leguminosa hiberna (*Sesbania rostrata*),

observou que o uso a longo prazo melhora atributos do solo, diminui a utilização de fertilizante nitrogenado, e aumenta a produtividade do arroz de 9 a 11%.

5.6 CONCLUSÕES

O cultivo no período hibernal de trevo persa aumenta a disponibilidade de nitrogênio mineral para a cultura do arroz irrigado estabelecida em sucessão.

O carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana do solo são pouco afetados em um sistema recente de adoção de trevo persa tradicionalmente cultivado com arroz irrigado.

O cultivo de trevo persa no período de outono inverno reduz em 23% a dose de máxima eficiência econômica da adubação nitrogenada do híbrido de arroz estabelecido em sucessão.

O cultivo dessa leguminosa no período de outono/inverno, em sistemas de produção de arroz irrigado no Sul do Brasil, é uma alternativa promissora, pois possui alta capacidade de produção de matéria seca e contribui com o aporte de nitrogênio ao solo com reflexos na menor necessidade de adubação nitrogenada na cultura do arroz.

6 CAPÍTULO 2: ÉPOCAS DE MANEJO QUÍMICO DE TREVO PERSA E O IMPACTO NA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E O DESENVOLVIMENTO DO ARROZ IRRIGADO

6.1 Introdução

A cultura do arroz irrigado possui grande importância no Sul do Brasil, principalmente por se adaptar em solos hidromórficos que são de grande ocorrência nessa região (PINTO *et al.*, 2017). Seu cultivo ainda é realizado em grande parte do RS por vários anos seguidos, com o sistema convencional de preparo do solo, permanecendo áreas em pousio no período de outono/inverno o que contribui para diminuir os teores de carbono orgânico e a atividade microbiana do solo (MARTINS *et al.*, 2017) com impactos negativos sobre as frações lábeis de N que são importantes para suprir esse nutriente à cultura do arroz (CARLOS *et al.*, 2021). No RS, cerca de 80% dos solos arroseiros do Sul do Brasil, possuem menos de 2,5% de MO, principalmente em razão do intensivo preparo do solo associado a ausência de culturas hibernais (BOENI *et al.*, 2010). Nesse cenário, com o avanço das tecnologias de manejo e cultivares de alto potencial, há uma demanda de altas doses de fertilizantes, principalmente nitrogenado, para obtenção de um nível satisfatório de produtividade (CARMONA *et al.*, 2016). Diante disso, tem se buscado a introdução de leguminosas nesses sistemas especializados e altamente intensivos com o objetivo de auxiliar na sustentabilidade da produção orizícola, principalmente, em razão dos potenciais impactos no ambiente decorrente do uso de altas doses de N (CAI *et al.*, 2018).

No cultivo de arroz irrigado utiliza-se por muito tempo o pousio em áreas de terras baixas, principalmente, em razão da condição de drenagem que ocasiona frequentemente excesso hídrico na camada superficial do solo. Essa condição afeta o estabelecimento e desenvolvimento de culturas de cobertura e diminui as opções de plantas para utilização nesses solos hidromórficos (MENEZES *et al.*, 2001). Contudo, vem ganhando destaque a utilização do trevo persa (*Trifolium resupinatum* L.) por ser uma planta com tolerância ao excesso hídrico, com uma adequada adaptação aos solos de terras baixas, precocidade

de desenvolvimento e qualidade na produção de MS (5 a 6 Mg ha⁻¹) (DA COSTA, 2005).

Em ambiente de terras altas, os benefícios do uso de plantas leguminosas hibernais e o reflexo no aumento dos teores de carbono orgânico do solo são conhecidos, comparativamente aos sistemas sem cobertura hiberna (VELOSO *et al.*, 2018). Entre as características peculiares de leguminosas destaca-se a baixa relação carbono/nitrogênio (C:N), altos teores de N na matéria vegetal e, conseqüentemente, reflete em uma decomposição relativamente rápida, disponibilizando N para culturas em sucessão (ALVARENGA *et al.*, 2001).

Em sistemas de produção de arroz irrigado, atualmente a planta hiberna mais utilizada é o azevém, que é uma gramínea, com pico de crescimento na primavera e que tem uma alta relação C:N ao final do ciclo comparado ao trevo persa. Dessa forma, muitos produtores utilizam o manejo químico do azevém com antecedência de 30 a 40 dias previamente a semeadura da cultura do arroz, principalmente em condições de elevada produção de MS (> 5 Mg ha⁻¹) (SOSBAI, 2018). O manejo químico do trevo persa vem sendo realizado em intervalos de tempo similares aos recomendados para o azevém. Essa antecipação do manejo químico tem o objetivo de reduzir o volume de resíduos vegetais e a possível geração de ácidos orgânicos pela fermentação do carbono orgânico durante o alagamento do solo, que podem ser prejudiciais ao desenvolvimento das plântulas de arroz (SOUSA, 2001). Contudo, o trevo persa possui composição bioquímica bastante diferente do azevém que pode tornar distinta a sua mineralização e disponibilização de nutrientes para a cultura do arroz irrigado em sucessão.

Este estudo parte da hipótese que o manejo químico da leguminosa hiberna mais próximo da semeadura da cultura do arroz, propicia maior tempo de desenvolvimento das plantas de trevo persa, maior período de FBN e de ciclagem de nutrientes. Além disso, em razão da baixa relação C:N dessa leguminosa hiberna, o manejo químico mais próximo da semeadura pode possibilitar um melhor sincronismo entre mineralização e a demanda de nutrientes pela cultura do arroz com impacto em maior produção de MS. Desta forma, este trabalho teve o objetivo de avaliar o efeito de épocas de manejo químico do trevo persa sobre a produção de matéria seca do trevo persa,

disponibilidade de nutrientes, síntese de clorofila e a produção de biomassa da cultura do arroz irrigado.

6.2 Material e métodos

6.2.1 Instalação e solo utilizado no experimento

O experimento foi conduzido no ano agrícola 2019/2020 em casa de vegetação do Departamento dos Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), localizada no município do Capão do Leão, RS.

O experimento foi disposto em um delineamento em blocos ao acaso (DBC) com 4 repetições, composto de um fatorial 4 x 2 + 2. O fator 1 foi composto de 4 intervalos de manejo químico, sendo: 45, 30, 15 dias antes da semeadura (DAS) e 0 DAS (no momento da semeadura). O fator 2 consistiu de duas doses de adubo nitrogenado: 0 e 150 kg N ha⁻¹, sendo a ureia utilizada como fonte de N. Ainda, para avaliar o efeito da disponibilidade de nutrientes no solo e impacto no desenvolvimento de arroz foram utilizados dois tratamentos de pousio, também nas doses de 0 e 150 kg N ha⁻¹. Cada unidade experimental foi composta por um vaso de plástico preto de 12 L, com 11 kg de solo seco. O solo utilizado no estudo foi o Planossolo Háplico (STRECK *et al.*, 2018) coletado no município do Capão do Leão, e caracterizado quimicamente (Tabela 1) no Laboratório de Química do Solo da FAEM, segundo metodologia proposta por Tedesco *et al.* (1995).

Tabela 2. Atributos do Panossolo háplico previamente ao estabelecimento do experimento em casa de vegetação. Capão do Leão-RS, 2019.

MO	Argila	pH	SMP	CTC	CTC	P	K	Ca	Mg	Al	H+AL	m%	V%
-----%-----		H ₂ O		pH7	efetiva								
				cmol _c dm ⁻³	dm ⁻³	mg dm ⁻³				-----cmol _c dm ⁻³ -----			
1,93	20	4,8	5,8	9,5	4,8	16,2	47	2,6	1,2	0,8	5,5	16,7	42

pH em água 1:1; Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e CTC a pH 7,0. Argila determinada pelo método do densímetro; MO por digestão úmida e P e K determinados pelo método de Mehlich I.

A calagem foi realizada para elevar o pH do solo a 6,0 conforme a Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC (2016), assim como as

doses equivalentes a kg ha^{-1} de P, sendo (180 kg ha^{-1} de P_2O_5) e de K sendo (150 kg ha^{-1} de K_2O), que foram incorporadas ao solo junto com o calcário (PRNT 85%) na instalação do experimento. Após a incorporação do calcário, do P e do K, foram instalados extratores de solução do solo nos vasos, de acordo com a metodologia descrita por Sousa *et al.*, (2002) nas profundidades de 5 e 10 cm (Figura 1). A semeadura do trevo persa cultivar *lightning* ocorreu no dia 31 de abril, e o arroz foi semeado em 11 de outubro de 2019. Foram semeadas 40 sementes de trevo persa por vaso, sendo as plantas posteriormente desbastadas, mantendo-se 10 plantas por vaso (simulando a densidade de $4,5 \text{ kg de sementes ha}^{-1}$). Por ocasião da semeadura do arroz, foram semeadas 8 sementes da cultivar IRGA 424 RI em todos os tratamentos. Posteriormente as plantas foram desbastadas sendo cultivadas 2 plantas de arroz por vaso.

A adubação nitrogenada de cobertura no arroz irrigado foi parcelada em duas aplicações, 67% em V_3 (início do alagamento) e 33% no estágio R_0 (SOSBAI, 2018).



Figura 12. Instalação dos extratores de solução do tipo espiral nos vasos previamente à semeadura da cultura do trevo persa. FAEM/UFPeL, Capão do Leão-RS.

6.2.2 Evolução e desenvolvimento do trevo persa e do arroz irrigado

A produção de massa de matéria seca (MMS) do trevo persa foi avaliada a partir da coleta de uma planta representativa por vaso em cada intervalo de manejo químico. O material foi coletado, pesado, identificado e levado para

secagem em uma estufa a 65°C por 3 dias, ou até manter o peso constante para então ser determinada a MMS de uma planta. O valor obtido foi extrapolado para as demais plantas do vaso, determinando-se, desta forma, a MMS total produzida por vaso.

A determinação da MMS do arroz foi realizada no dia 10 de janeiro de 2020 quando as plantas se apresentavam no estágio R₂, pelo corte total das plantas do vaso, sendo a secagem e determinação da MMS realizada de forma semelhante à descrita para o trevo persa.

6.2.3 Parâmetros fisiológicos

As avaliações dos parâmetros fisiológicos (clorofila, flavonoides, antocianinas e índice de balanço de nitrogênio) foram realizadas no estágio fenológico V₉ (Counce, 2000), imediatamente após a segunda adubação nitrogenada de cobertura, foram aferidas com auxílio de um clorofilômetro (modelo Dualex FORCE-A, Orsay, France) a partir da média das leituras em duas plantas por vaso, em quatro vasos por tratamento (8 leituras por tratamento), em folhas do terço médio de cada planta.



Figura 13. Avaliação dos parâmetros fisiológicos realizada com o clorofilômetro em estádio fenológico R₀. FAEM/UFPEL, Capão do Leão-RS.

6.2.4 Teores de nutrientes na matéria seca do arroz

Os teores de nutrientes no tecido vegetal do arroz foram avaliados em amostras de 0,2 g de tecido moído em peneira de 2 mm, submetidos à digestão ácida em alta temperatura para transformação dos nutrientes de formas orgânicas para minerais (TEDESCO *et al.*, 1995). Posteriormente, do extrato resultante da digestão foi determinado o teor de N total pelo método de destilação *Kjeldahl*, o teor de P determinado por espectrofotometria visível e o teor de K foi determinado por espectrofotometria de emissão de chama (TEDESCO *et al.*, 1995).

6.3 Análise estatística dos dados

Os dados foram submetidos à avaliação de normalidade pelo método de Shapiro-Wilk. Obedecendo aos pressupostos de distribuição normal, as variáveis estudadas foram submetidas à análise de variância. Os dados de produção de

matéria seca do trevo e de arroz irrigado foram submetidos a análise de regressão linear sob diferentes intervalos de manejo químico, com ausência do tratamento pousio. Os dados de nutrientes na solução do solo foram distribuídos nos diferentes períodos de alagamento com avaliação da distribuição por desvio padrão. O teste de Tukey foi utilizado para análise de médias de disponibilidade de nutrientes do período vegetativo e a ANOVA para médias de pousio e trevo nas duas doses de N. Dados fisiológicos também foram submetidos a ANOVA e, quando significativo, aplicado teste de Tukey ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas com suporte dos programas estatísticos R e SPSS 24.

6.4 Resultados

6.4.1 Produção de massa de matéria seca da parte aérea do trevo persa

As maiores produções de MMS da parte aérea, ocorreram com o manejo químico realizado no dia da semeadura da cultura do arroz irrigado (Figura 14). Observou-se uma redução de 1,69 g da MS do trevo por vaso a cada dia de aumento do intervalo de manejo químico. Essa antecipação do manejo químico representa uma redução de 1,29% por dia. Em uma situação de maior intervalo de manejo químico, realizado aos 45 DAS, observou-se uma redução de 58% na produção da massa de matéria seca da parte aérea do trevo persa quando comparado ao 0 DAS (Figura 14).

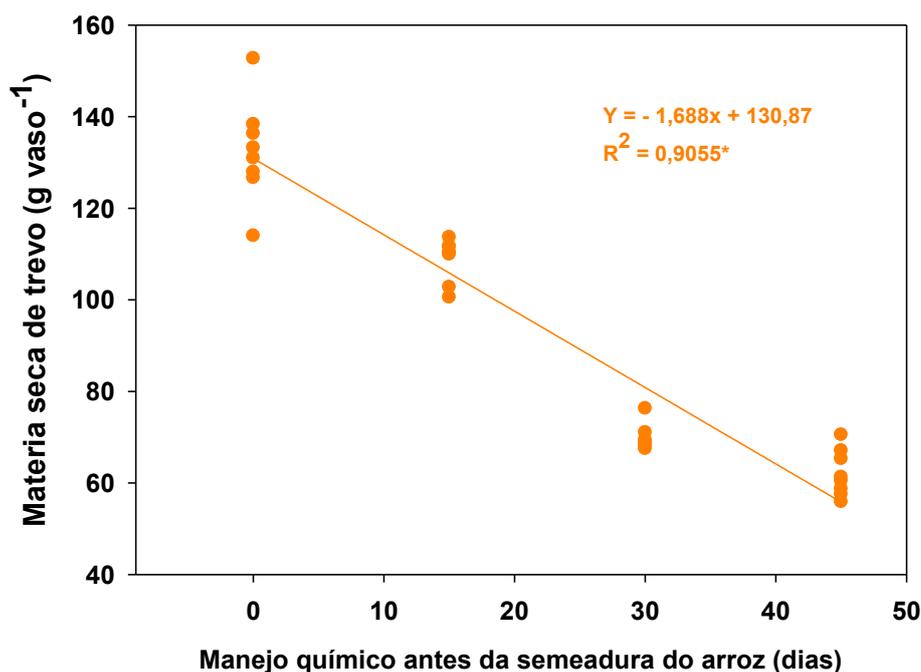


Figura 14. Massa de matéria seca da parte aérea de trevo persa, cultivar *Lighting*, sob diferentes tempos de manejo químico antes da semeadura do arroz. * significativo ($p < 0,05$). FAEM/UFPeI, Capão do Leão-RS.

6.4.2 Nitrogênio, fósforo e potássio na solução do solo

Os tratamentos com manejo químico mais próximo da semeadura do arroz (0 DAS), em geral, tiveram um maior teor de N mineral (amônio e nitrato) na solução do solo nos primeiros 30 dias de alagamento (Figura 15a). À medida que aumentou o intervalo do manejo químico da leguminosa hiberna antes da semeadura do arroz houve uma redução na disponibilidade mineral na solução do solo e foi mais pronunciada na dose de 0 kg N ha⁻¹ do que na dose de 150 kg N ha⁻¹. Na dose de 0 kg N ha⁻¹, houve redução dos teores de 12,2 mg L⁻¹ no tratamento 0 DAS para 4,2 mg L⁻¹ na média dos demais intervalos de manejo químico (15, 30 e 45 DAS) (Figura 15b), o que representou uma redução de 65,7%. Na dose de 150 kg de N ha⁻¹, o manejo químico aos 0 DAS comparado à média dos demais intervalos (15, 30 e 0 DAS) houve uma redução da disponibilidade N mineral na solução do solo no período vegetativo de 4,3 mg L⁻¹, que representa 16,3% (Figura 15b). Assim, o teor médio de N, nos primeiros 30 dias de avaliação, independentemente da dose e do intervalo de manejo

químico, foi de 6,99 mg L⁻¹ nos tratamentos pousio e de 14,58 mg L⁻¹ com a leguminosa hibernal, o que representa um aumento de 108%.

Na dose 0 kg N ha⁻¹ sob pousio, o teor médio de N mineral foi de 0,97 mg L⁻¹, já nos tratamentos com trevo na mesma dose, o teor médio foi de 6,19 mg L⁻¹, o que representa um aumento absoluto de 5,22 mg L⁻¹ (Figura 15c). No tratamento com 150 kg N ha⁻¹, o teor médio no pousio foi de 13,01 mg L⁻¹ e nos tratamentos com trevo o teor médio foi de 22,98 mg L⁻¹, um incremento absoluto de 9,97 mg L⁻¹, quase o dobro do verificado no tratamento 0 kg N ha⁻¹ (Figura 15c). O tratamento 0 DAS na dose de 0 kg N ha⁻¹ apresentou o mesmo teor de N mineral comparado com o tratamento pousio 150 kg N ha⁻¹ (Figura 15b)

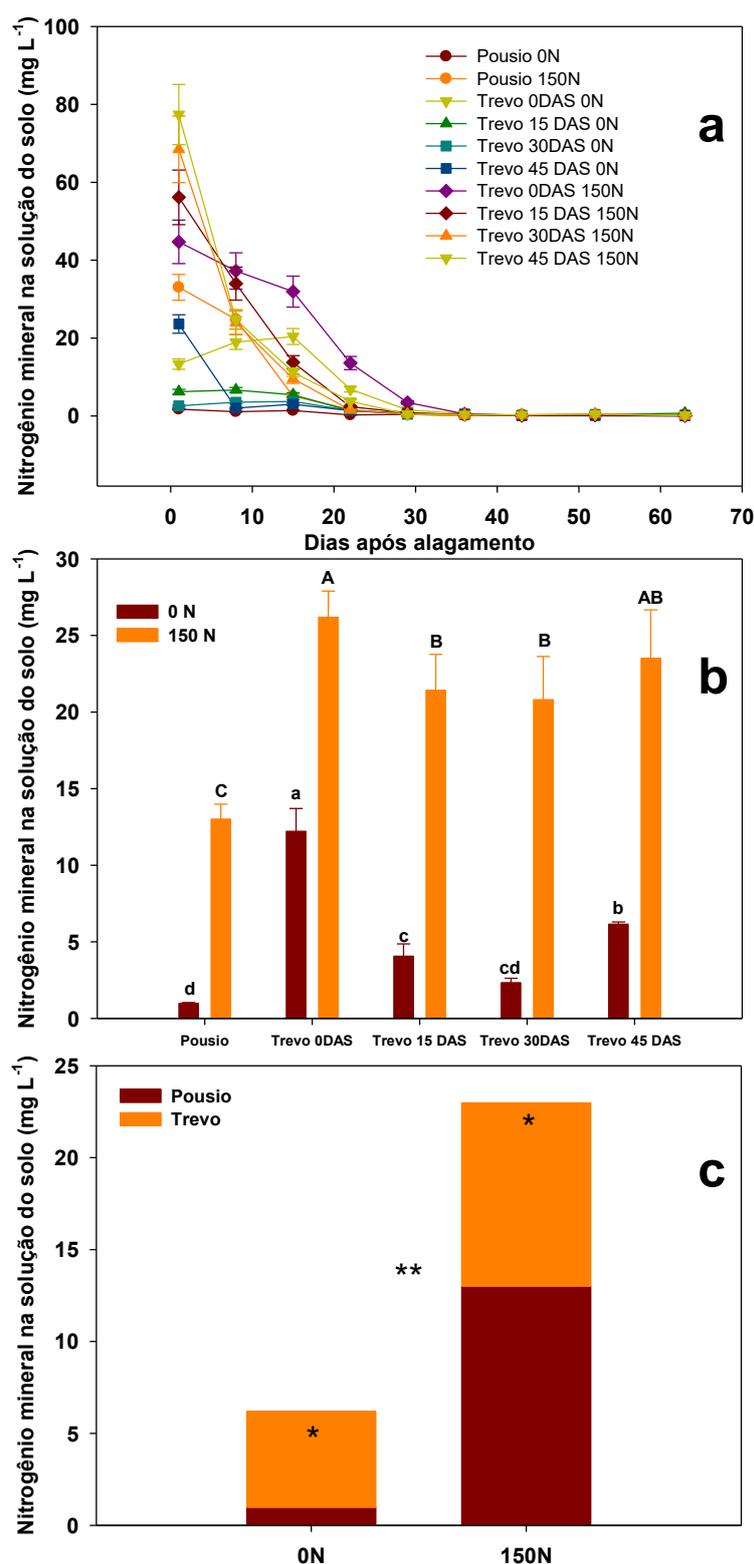


Figura 15. Teores de nitrogênio mineral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) na solução (a) do solo após o alagamento sob diferentes tempos de manejo químico do trevo antes da semeadura do arroz. Figuras (b) e (c) com os dados médios do período vegetativo, primeiros 30 dias de alagamento. *significativo p/ coberturas e ** p/ doses de N ($p < 0,05$). Letras minúscula e maiúscula comparam dose de 0N e 150N, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPel, Capão do Leão-RS.

As épocas de manejo químico do trevo também influenciaram a disponibilidade de P na solução do solo (Figuras 16a e 16b). Diferentemente do que se observou com o N, quando realizado o manejo químico mais próximo da semeadura do arroz, houve uma menor disponibilidade de P na solução do solo (Figuras 16b). O aumento na disponibilidade de P na solução do solo foi mais acentuado na dose de 0 kg N ha⁻¹. Na comparação de 0 DAS e 30 DAS, o aumento foi de 0,42 e 0,21 mg L⁻¹ nas doses de 0 e 150 kg N ha⁻¹, respectivamente. Na comparação os dados médios, a presença do trevo persa, não influenciou na disponibilidade de P na solução do solo (Figura 16c). Contudo, a adição de N aumentou (+20,3%) a disponibilidade de P na solução do solo (Figura 16c).

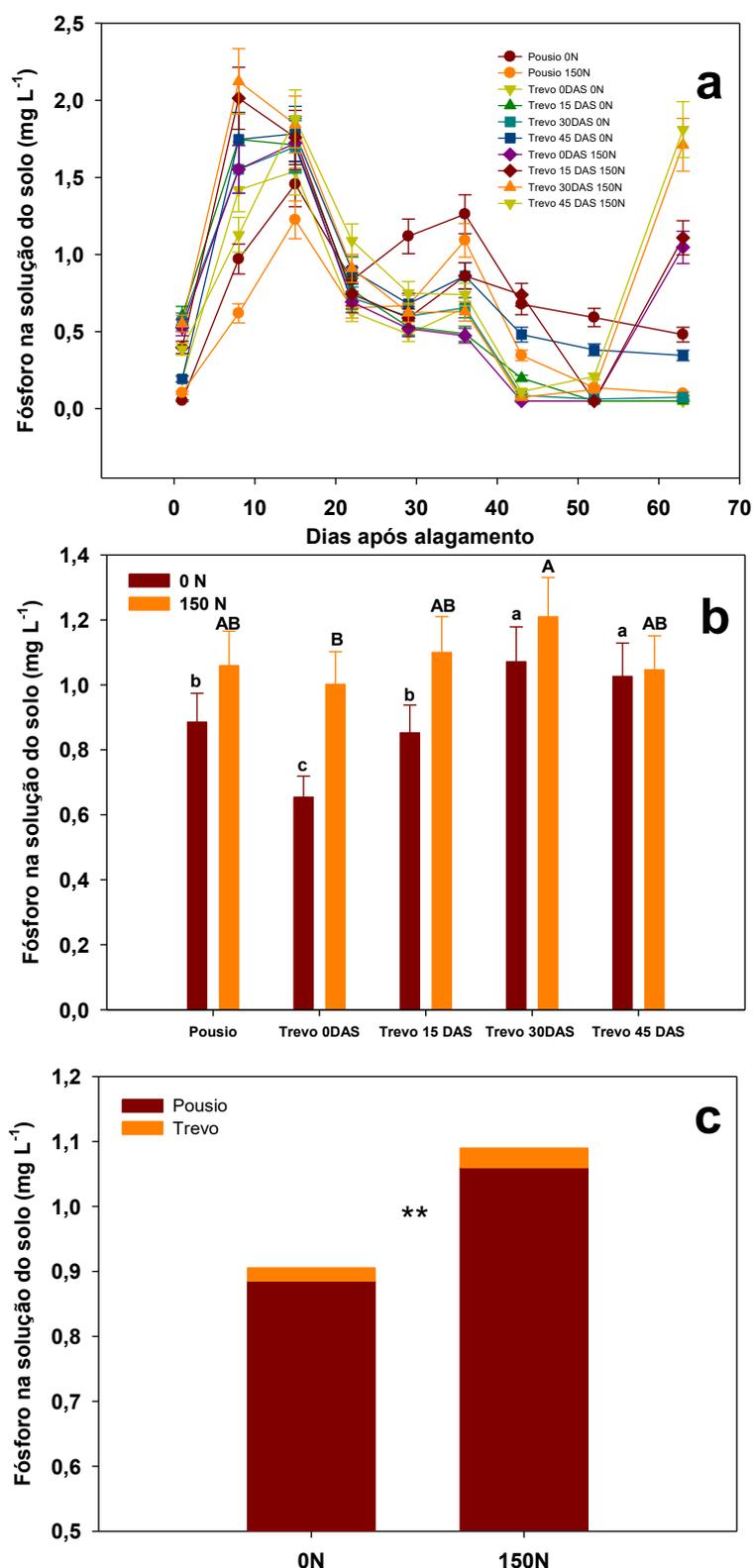


Figura 16. Teores de fósforo na solução (a) do solo após o alagamento sob diferentes tempos de manejo químico do trevo antes da semeadura do arroz. Figuras (b) e (c) com os dados médios do período vegetativo, primeiros 30 dias de alagamento. *significativo p/ coberturas e ** p/ doses de N ($p < 0,05$). Letras minúscula e maiúscula comparam dose de 0N e 150N, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPel, Capão do Leão-RS.

Similar ao comportamento do N e P, também se observou influência das épocas de manejo químico da leguminosa hiberna no teor K na solução do solo (Figuras 17a e 17b). O aumento na disponibilidade de K de 0 DAS para 45 DAS foram de 14,96 e 25,59 mg L⁻¹ nas doses de 0 e 150 kg N ha⁻¹, respectivamente o que demonstrou um aumento superior quando foi adicionado N.

Na média dos tratamentos o trevo persa, houve aumento na concentração de K na solução do solo somente na dose de 0 kg N ha⁻¹, sob pousio da concentração de 8,38 mg L⁻¹ para a média dos tratamentos com trevo de 16,01 mg L⁻¹. Já na dose de 150 kg N ha⁻¹ sob pousio se observou uma concentração de 31,68 mg L⁻¹ e, na média dos tratamentos com trevo persa, uma redução para 26,75 mg L⁻¹.

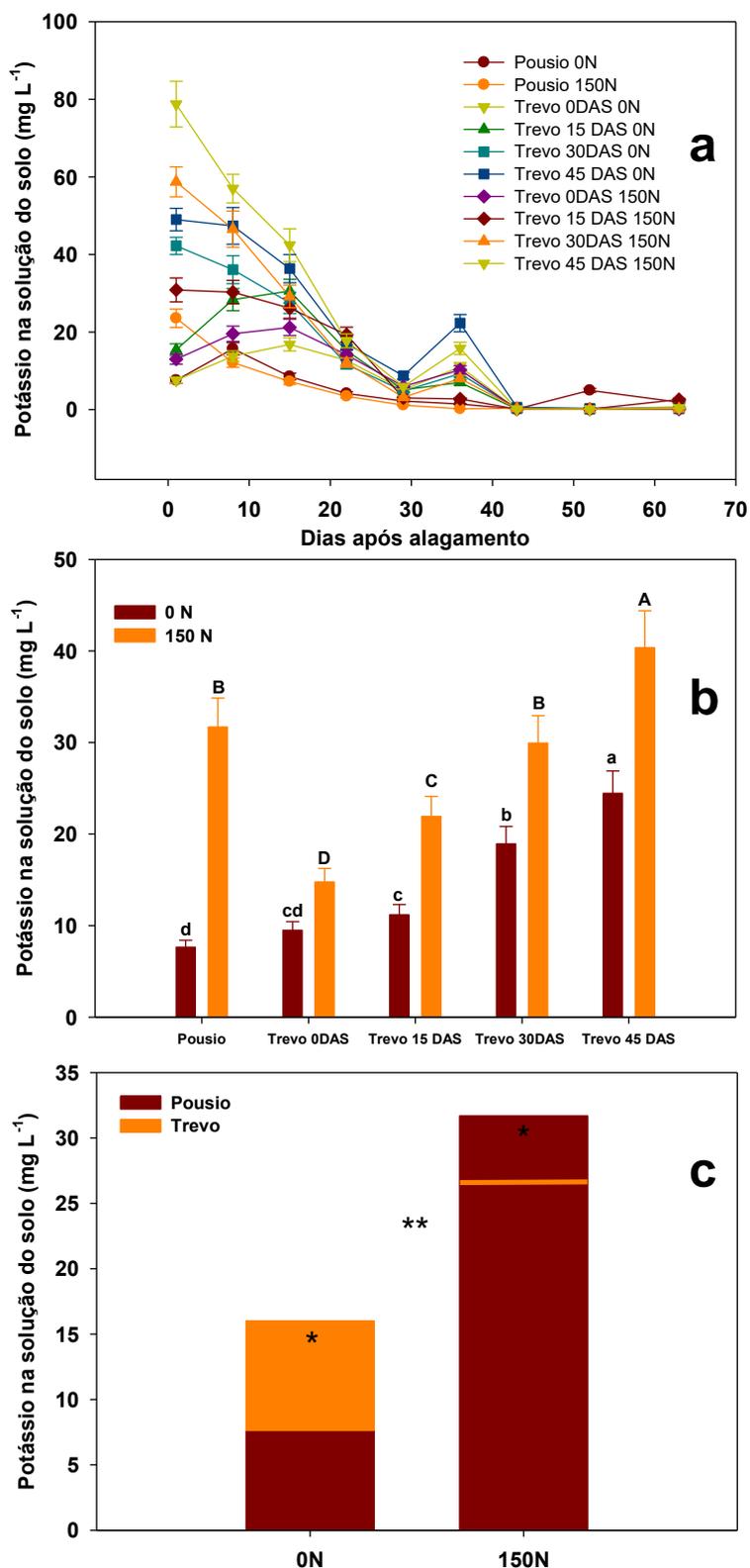


Figura 17. Teores de potássio na solução (a) do solo após o alagamento sob diferentes tempos de manejo químico do trevo antes da semeadura do arroz. Figuras (b) e (c) com os dados médios do período vegetativo, primeiros 30 dias de alagamento. *significativo p/ coberturas e ** p/ doses de N ($p < 0,05$). Letras minúscula e maiúscula comparam dose de 0N e 150N, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPel, Capão do Leão-RS.

Houve grande influência das épocas de manejo químico e da dose de N na quantidade de N absorvida pelas plantas de arroz por vaso (Figura 19a). No tratamento 0 DAS verificou-se que a quantidade de N absorvida foi superior ao tratamento 45 DAS em 77 e 33% nas doses de 0 e 150 kg N ha⁻¹, respectivamente. A quantidade de N absorvida pelo tratamento 0 DAS na dose de 0N foi 189% superior ao tratamento pousio na mesma dose (Figura 19a). E na dose de 150 kg N ha⁻¹ a quantidade de N absorvida foi 84% superior em relação ao pousio na dose de 0 kg N ha⁻¹.

O P, similar ao N, também apresentou tendência de redução na absorção à medida que houve aumento do intervalo do manejo químico (Figura 19b). A quantidade absorvida de P pelas plantas de arroz foi 57 e 10% maior aos 0 DAS do que aos 45 DAS nas doses de 0 e 150 kg N ha⁻¹, respectivamente (Figura 19b). A quantidade absorvida de P no tratamento 0 DAS em relação ao pousio foi de 123 e 45% nas doses de 0 e 150 kg N ha⁻¹, respectivamente.

O K apresentou, ao contrário dos demais nutrientes, tendência de aumento na absorção do elemento pelas plantas à medida que houve aumento no intervalo do manejo químico, principalmente na dose de 150 kg N ha⁻¹ (Figura 19c). A absorção de K foi 38% superior aos 45 DAS em comparação ao 0 DAS na dose de 150 kg N ha⁻¹ (Figura 19c). Na dose de 0 kg N ha⁻¹ não se observou diferença. Em relação ao pousio, os tratamentos manejados aos 45 DAS, independente da dose, tiveram aumento de 40% na absorção de K.

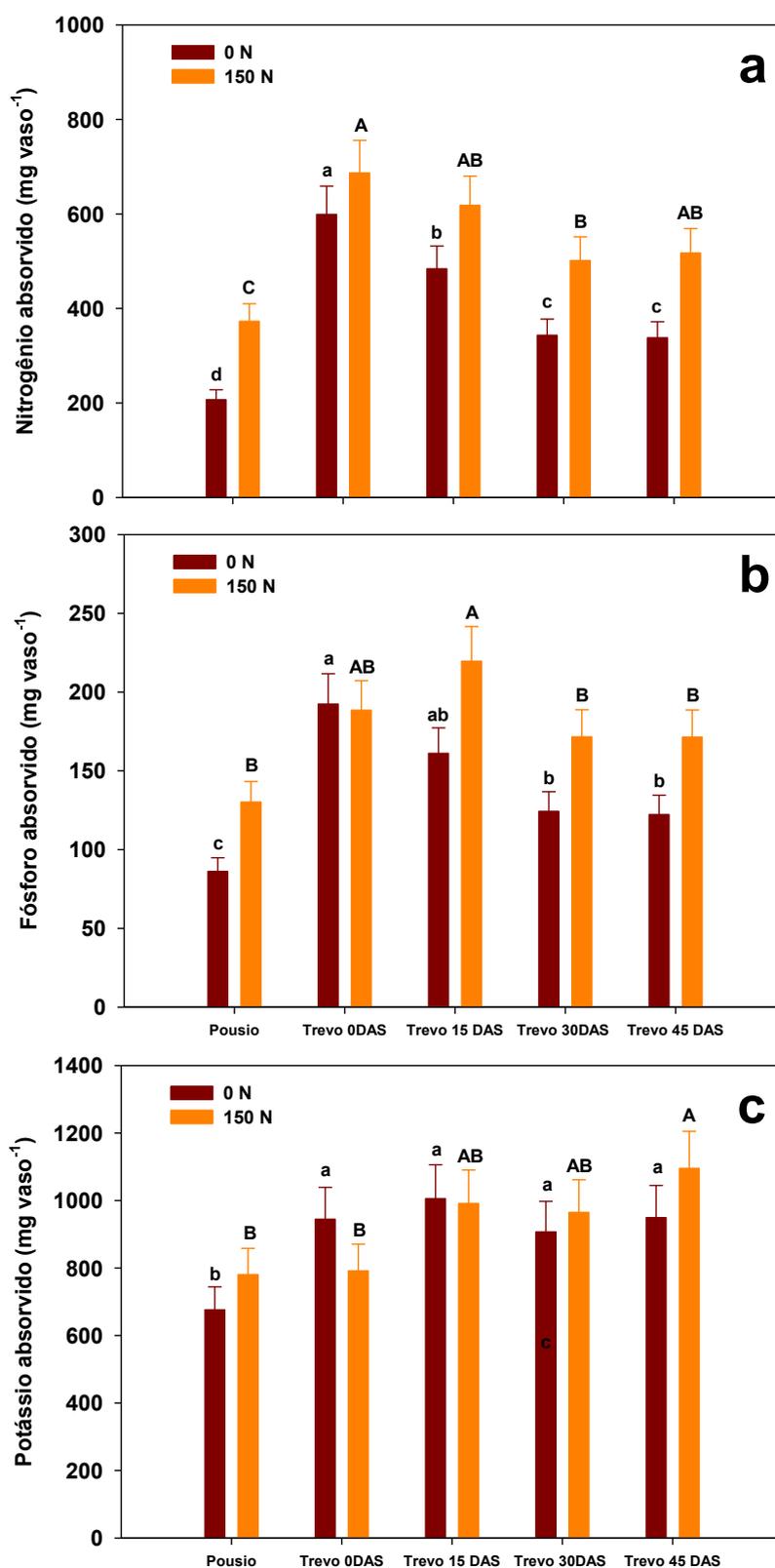


Figura 18. Quantidade de nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) absorvidos por vaso nos diferentes intervalos de manejo químico de trevo persa com cultivo de arroz irrigado em sucessão. Letras minúscula e maiúscula comparam dose de 0N e 150N, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPeL, Capão do Leão-RS.

6.4.3 Produção de matéria seca de arroz

A produção de MS do arroz foi afetada pelas épocas de manejo químico do trevo persa (Figura 18a). Na dose de 0 kg N ha⁻¹ há uma redução na produção de MS de 0,81 g por dia de antecipação do manejo químico da leguminosa hiberna e, na dose de 150 kg N ha⁻¹, 0,59 g. Essas reduções representam 0,79 e 0,51% do rendimento relativo de matéria seca nas doses de 0 e 150 N ha⁻¹, respectivamente.

A produção de MS da parte aérea de arroz apresentou uma relação linear ($p < 0,05$) com a produção de MS da parte aérea de trevo persa (47,8%) (Figura 18b). O Aumento de cada grama da MMS da parte aérea do trevo persa impacta no aumento de 0,39 g de MMS da parte aérea de arroz (Figura 18b).

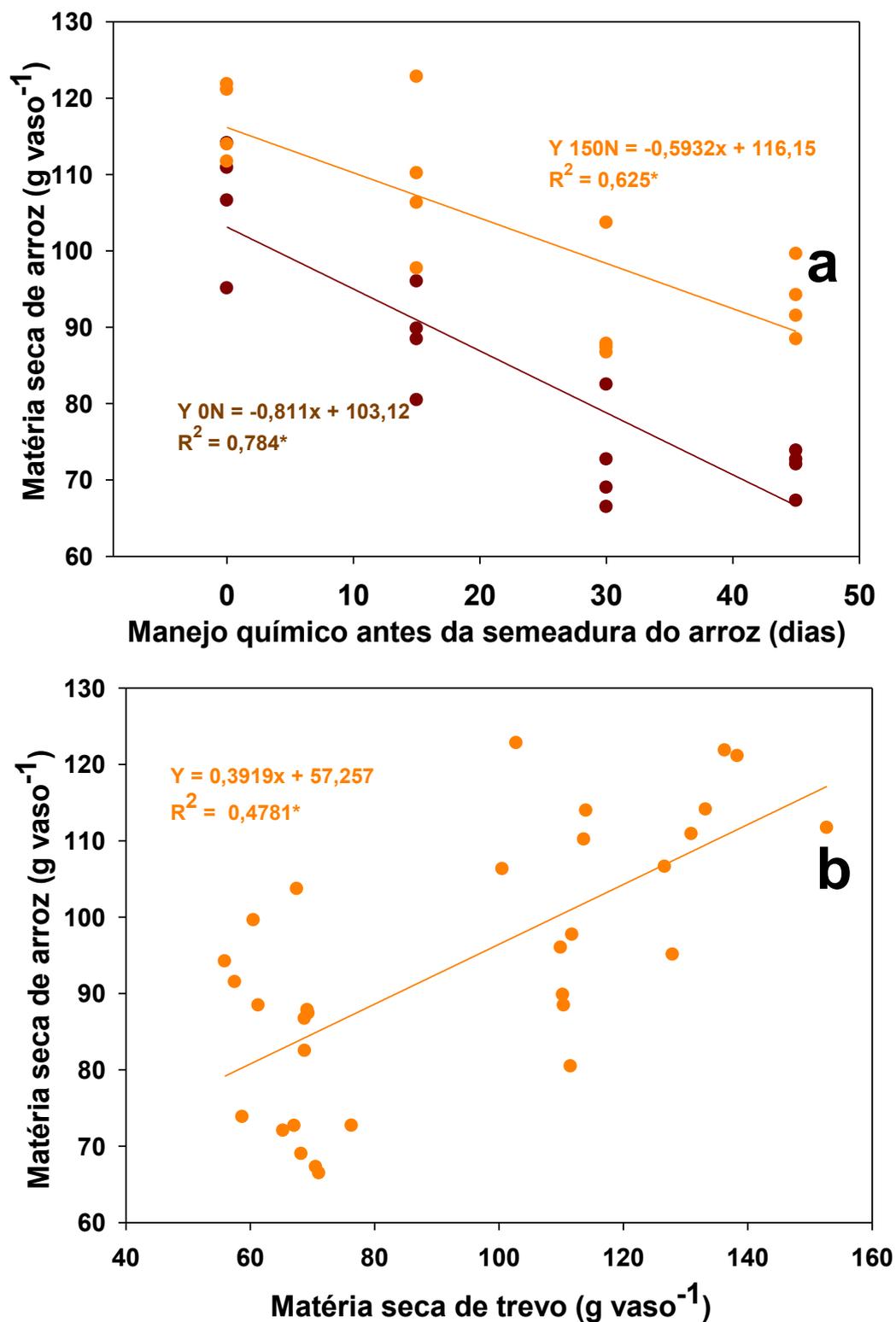


Figura 19. Matéria seca da parte aérea de arroz (a) em duas doses de N, 0 e 150 kg N ha⁻¹, cultivar IRGA 424 RI e correlação entre produção de matéria seca da parte aérea de trevo e matéria seca da parte aérea de arroz irrigado (b) sob diferentes tempos de manejo químico do trevo antes da semeadura do arroz. * significativo (p<0,05). Barras verticais indicam desvio padrão. FAEM/UFPel, Capão do Leão-RS.

6.4.4 Parâmetros fisiológicos nas plantas de arroz

Os tratamentos com trevo persa 0 e 15 DAS na dose 0 kg N ha⁻¹ apresentaram tendência de maiores índices de clorofila nas folhas de arroz, porém não apresentaram diferença entre si (Tabela 3). Já os tratamentos 30 e 45 DAS 0 kg N ha⁻¹ com trevo, apresentaram valores semelhantes ao pousio na mesma dose de N. Na dose de 150 kg N ha⁻¹ não houve diferença ($p < 0,05$) para clorofila assim como para os índices de flavonoides. As antocianinas foram detectadas somente nos tratamentos pousio, nas duas doses. Para o índice de balanço de N, houve efeito da época do manejo químico do trevo persa na dose 0 kg N ha⁻¹, onde o tratamento trevo 0 DAS diferiu dos outros manejos químicos, que apresentaram índices intermediários, e do tratamento pousio, com menores índices. Já na dose 150 kg N ha⁻¹, os intervalos de manejo químico apresentaram valores semelhantes, diferindo do tratamento pousio para o índice de N.

Tabela 3. Índice de clorofila, flavonoides, antocianinas e balanço de nitrogênio de folhas de arroz sob diferentes tempos de manejo químico de trevo persa previamente a semeadura de arroz irrigado nas doses de 0 e 150 kg N ha⁻¹. FAEM/UFPel, Capão do Leão-RS.

	Clorofila ---kg N ha ⁻¹ ---		Flavonoides ---kg N ha ⁻¹ ---		Antocianinas ---kg N ha ⁻¹ ---		Balanço de nitrogênio ---kg N ha ⁻¹ ---	
	0	150	0	150	0	150	0	150
	-----Índice-----							
Pousio	21,98 b	25,05 ns	1,69 ns	1,46 ns	0,17	0,11	13,03 c	13,33 b
Trevo 0 DAS	34,66 a	25,74	1,48	1,41	0,00	0,00	23,40 a	18,29 a
Trevo 15 DAS	29,36 a	27,07	1,56	1,44	0,00	0,00	19,01 b	19,10 a
Trevo 30 DAS	26,24 ab	27,44	1,57	1,62	0,00	0,00	17,10 b	17,01 a
Trevo 45 DAS	28,22 ab	28,07	1,59	1,54	0,00	0,00	19,92 b	18,29 a

Letras minúsculas comparam na coluna (Tukey, $p < 0,05$). ns: não significativo.

6.5 Discussão

A produção de massa seca da parte aérea do trevo persa, foi influenciada positivamente pela época dos manejos químicos realizados (Figura 14), portanto quanto mais próximo da semeadura do arroz, maior quantidade foi produzida. Esse fato está associado ao maior tempo de crescimento do trevo persa nesses tratamentos (0, 15 e 30 dias) em relação ao manejo químico realizado aos (45 DAS). Outro fator que deve ser levado em consideração é o fato dos primeiros

maneios químicos terem sido realizados na época de maior crescimento do trevo persa, pois seu período de maior produção de biomassa ocorre de junho a dezembro (BORTOLINI *et al.*, 2012). Pode-se observar que o manejo químico realizado aos 45 DAS e aos 0 DAS possibilitaram 119 e 164 dias de desenvolvimento do trevo persa, respectivamente. Ou seja, um período de desenvolvimento de 45 dias a mais (+37,8%) quando o manejo químico foi feito no dia da semeadura do arroz (0 DAS). Esse maior período propicia maior FBN, maior crescimento das plantas e maior potencial de ciclagem de nutrientes que possuem grande reflexo no desenvolvimento das plantas estabelecidas em sucessão.

A leguminosa hibernal teve grande influência no teor de N na solução do solo. No manejo químico no dia da semeadura do arroz irrigado se observou alta quantidade de N na solução do solo, possivelmente explicado pelo alto teor de aminoácidos e proteínas no resíduo da leguminosa o que confere uma baixa relação C:N e uma rápida mineralização e disponibilização de N às plantas. Além disso, o manejo químico feito próximo à semeadura do arroz possibilita o maior desenvolvimento das plantas de trevo persa e, com isso, maior capacidade de acúmulo de N potencialmente mineralizável e a ser disponibilizado na solução do solo. Como se observou, com 45 DAS a produção de MS do trevo foi de 58% menor do que aos 0 DAS.

A redução da disponibilidade de N foi bem mais drástica quando não houve adição de N em relação aos tratamentos com sua adição. Logo, em sistemas de menor aporte de N, como na produção de arroz de base ecológica, isentos do aporte de N externo, a utilização do trevo persa pode ser uma importante alternativa suprimento do nutriente às plantas de arroz. Esse fato fica mais evidente quando foi realizado o manejo químico aos 0 DAS na dose de 0 kg N ha⁻¹, constata-se uma mesma disponibilidade de N na solução do solo que quando foi utilizado 150 kg N ha⁻¹ sob pousio (Figura 15b). A redução menos acentuada do N na solução do solo nos diferentes tempos de manejo químico na dose de 150 kg N ha⁻¹, o que demonstra que, possivelmente esteja ocorrendo o efeito *priming* (JIANG *et al.*, 2021). O efeito *priming* ocorre quando há o aumento na disponibilidade de N, principalmente da adubação, que causa uma indução na atividade microbiana a atuar na mineralização das frações lábeis da MOS em maior intensidade e disponibilizar N às culturas agrícolas. Além da indução pelo

efeito *priming*, o N, proveniente da adubação e da mineralização de resíduos vegetais, provoca um maior desenvolvimento das plantas e maior capacidade de liberação de exsudatos. Estes compostos orgânicos são fonte de C e energia e estimulam a atividade microbiana a liberar, em maior intensidade, enzimas extracelulares que induzem a mineralização do N orgânico do solo (JIANG *et al.*, 2021). Alguns trabalhos indicam que a presença de plantas pode induzir até 380% a atividade de enzimas extracelulares e, conseqüentemente, a mineralização do N orgânico do solo (CHENG *et al.*, 2014). Contudo, os níveis de MO não são reduzidos, pois há aporte de resíduos vegetais, como raízes e parte aérea ao solo ao final do ciclo das culturas.

Nesse contexto, se observa a importância, em sistemas que visam a obtenção de satisfatórios níveis de produtividade de grãos, do suprimento de N tanto via leguminosas hibernais quanto a complementação via adubação nitrogenada. Esse fato foi mais evidente, quando se utilizou trevo, independentemente do intervalo de manejo químico, na dose de 150 kg N ha⁻¹, quando se observou uma maior disponibilidade de N mineral na solução do solo. Em algumas condições, doses intermediárias de N associadas ao uso da leguminosa hiberna pode ser uma estratégia adequada para suprir N à cultura do arroz irrigado.

Em trabalho similar de trevo persa sob plantio direto no Sul do Brasil Garcia (2020) observou o incremento de 3,35 mg L⁻¹ de N na comparação entre o tratamento com pousio sob preparo do solo ao tratamento com trevo persa e plantio direto. Essa maior disponibilidade de N mineral na solução do solo se refletiu no maior desenvolvimento de arroz irrigado estabelecido em sucessão.

Em relação ao P, o N aportado via leguminosa hiberna ou adubação nitrogenada pode alterar o perfil e a atividade da comunidade microbiana do solo, afetando, dessa forma, a mineralização do P orgânico em P mineral (KRITZLER E JOHNSON, 2010). Esse fato fica evidente pelo aumento na disponibilidade de P na solução do solo quando foi adicionado 150 kg N ha⁻¹. Por outro lado, o N estimula a maior produção primária, maior desenvolvimento das plantas, especialmente nos intervalos de manejo químico menores (0 e 15 DAS). Nestes intervalos de manejo químico, em razão do maior desenvolvimento das plantas há uma maior demanda por P, tanto pelas plantas quanto pela microbiota do solo (VITOUSEK *et al.*, 2010), o que pode contribuir para uma menor disponibilidade

deste nutriente na solução do solo nos intervalos de 0 e 15 DAS, especialmente quando não foi adicionado N. As leguminosas possuem alta capacidade de FBN e exigem maiores quantidades de P, assim, a ciclagem deste nutriente é mais intensa em espécies leguminosas com maior atividade de fosfatase (VENTERINK, 2011). O aumento da disponibilidade de P na solução do solo pelo trevo persa, na média dos intervalos de manejo químico, não foi tão evidente, possivelmente, em razão da alta dose de P utilizada na semeadura do trevo, (equivalente $180 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

O K teve uma liberação nos maiores intervalos de manejo químico (30 e 45 DAS). Este nutriente não fazendo parte da constituição de compostos orgânicos possui uma maior mobilidade após o manejo das culturas. Contudo, no presente estudo, verificou-se que, em maiores intervalos de manejo químico foi onde houve maior disponibilidade de K. Este fato indica que, possivelmente em solos alagados, a liberação de K em resíduos de leguminosas deve ocorrer de forma mais lenta. Outro fator observado foi o alto teor médio de K na solução do solo sob pousio na dose de 150 kg N ha^{-1} . Neste tratamento o teor de K na solução do solo foi superior até mesmo nos tratamentos com manejo químico aos 15 e 30 DAS. Este fato pode ser em razão do deslocamento do NH_4^+ do K dos sítios de sorção da CTC e das entre camadas de argilominerais 2:1, (K fixado). Mesmo em baixas quantidades em Planossolos, os argilominerais 2:1 possuem grande capacidade de fixar K^+ na entre camada e podem ser substituídos por íons monovalentes, como NH_4^+ (FRAGA *et al.*, 2009). O N aportado pela adubação pode ser demandado pelo metabolismo microbiano na mineralização da biomassa nos menores intervalos de manejo químico. Esta condição acarreta em um menor efeito de deslocamento do K para a solução do solo.

A maior disponibilidade de N no solo sob o menor intervalo de manejo químico (0 DAS) refletiu em maiores índices de clorofila e índice de balanço de N (Tabela 3). O maior sincronismo de liberação de N dos resíduos da leguminosa hiberna possibilitou uma maior absorção desse nutriente que é essencial na síntese de clorofila. Este aumento possibilita maior atividade fotossintética e maior produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, maior biomassa vegetal. A maior disponibilidade de N aportado pela leguminosa, possivelmente, seja o elemento mais responsivo ao desenvolvimento de crescimento e produção

de MMS de arroz. Essa condição é evidenciada pelo fato de haver nos intervalos de manejo químico aos 0 e 15 DAS, maior disponibilidade de N na solução do solo e que coincide com os intervalos de maior produção de MS de arroz. Por outro lado, as maiores disponibilidades de P e K foram verificadas aos 30 e 45 DAS, períodos de menor produção de MS de arroz, além de menores índices de clorofila e balanço de N.

Nas relações do crescimento do trevo persa e o impacto no desenvolvimento do arroz verificou-se pelo ajuste linear, na qual cada grama de MS de trevo induz na produção de 0,39 gramas de biomassa de arroz irrigado. Em um contexto de campo, pode-se observar produtividades de trevo persa de 6 Mg ha⁻¹. Nesta situação, considerando a relação de 0,39, haveria uma maior produção de 2,34 Mg ha⁻¹ de MMS da parte aérea de arroz, que em geral, possui um índice de colheita de 50%, ou seja, metade da biomassa produzida é convertida em grãos. Desta forma, poderiam ser produzidos 1,17 Mg ha⁻¹ a mais de grãos, que corrobora com o Estudo 1 que demonstra a relevância da leguminosa especialmente, em menores doses de adubo nitrogenado.

No presente estudo, fica evidente que a aproximação do manejo químico do trevo persa à semeadura do arroz é relevante para ter um melhor sincronismo na absorção de N pelas plantas com reflexo em maior produção de MS. Essa condição ocorre pela riqueza em aminoácidos, proteínas e outros compostos lábeis presentes nos resíduos de leguminosas que conferem uma maior velocidade de mineralização. Contudo, cabe salientar que esse trabalho foi conduzido em condições controladas e contrasta com algumas peculiaridades que ocorrem no campo e podem limitar a adoção de uma prática de manejo químico tão próxima da semeadura do arroz. O impedimento físico de alta quantidade de MS, cerca de 5 a 6 Mg ha⁻¹, pode ser um grande empecilho para uma adequada deposição de sementes no solo. Um segundo fator, é a retenção de umidade no solo, pois altas quantidades de resíduo vegetal em solos hidromórficos como os Planossolos podem aumentar o intervalo de tempo para que se tenha condições adequadas de umidade do solo e atrasar a semeadura e estabelecimento. Um terceiro fator, é a pressão por plantas daninhas que sofrem manejos químicos próximos à semeadura do arroz. Nesta condição, um grande desenvolvimento da biomassa da leguminosa pode ter um efeito “guarda-chuva” e não ter uma eficiência adequada de controle químico de plantas

daninhas competidoras com a cultura do arroz, especialmente as que se encontram sob o dossel da leguminosa hiberna. Por último, o quarto fator, a maior biomassa da leguminosa hiberna pode impactar na produção de ácidos orgânicos, como acético e propiônico que podem ser prejudiciais ao desenvolvimento inicial de plantas de arroz. Esse pico de produção de ácidos orgânicos pode ocorrer principalmente em anos chuvosos, que induzem condição de hipóxia no solo e tende a ser mais intenso quando da utilização de leguminosas (Sousa, 2001).

6.6 Conclusões

O manejo químico do trevo persa aos 45 dias antes da semeadura do arroz reduz substancialmente em 58% a quantidade de matéria seca no período de outono inverno.

O manejo químico da leguminosa hiberna mais próximo da semeadura aumenta o teor de N mineral na solução do solo e aumenta a síntese de clorofila e a absorção de nitrogênio pela cultura do arroz irrigado cultivado em sequência.

O cultivo da leguminosa hiberna, independentemente de intervalo de manejo químico e dose de nitrogênio, aumenta de forma substancial a disponibilidade de N mineral na solução do solo em 108% no período vegetativo de desenvolvimento do arroz.

Os maiores intervalos de manejo químico aumentam o teor de fósforo e potássio na solução do solo no período vegetativo de desenvolvimento de plantas de arroz.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cultivo de arroz irrigado nos últimos 30 anos passou por inúmeros processos de evolução, desde o lançamento de cultivares mais produtivos, sistema ClearField® até o Projeto 10 que agrupou uma série de práticas de manejo relevantes para aumentar a produtividade de arroz irrigado. Soma-se a esse quadro, a inserção do cultivo de soja em rotação, nos últimos 10 anos, e os seus inúmeros benefícios à cultura do arroz irrigado.

Os sistemas de produção em terras baixas ainda têm alguns desafios relacionados a práticas mais conservacionistas de produção desde a intensa mobilização como ocorrem nos principais sistemas adotados atualmente, convencional, pré germinado e cultivo mínimo (de fato preparo antecipado). O uso de coberturas hibernais é, hoje, o grande gargalo nestes sistemas de produção. Contudo, além do azevém, tem-se observado o aumento nos últimos anos da adoção de leguminosas hibernais, em especial do trevo persa. Porém, os manejos tanto de adubação nitrogenada na cultura do arroz em sucessão e o intervalo de manejo químico da leguminosa hibernal ainda são usados empiricamente.

Nesse sentido, esse trabalho demonstrou resultados em condições controladas e de campo sobre o reflexo do cultivo de trevo persa no desenvolvimento de arroz no Sul do Brasil, com foco principal na possibilidade de redução da necessidade de adubação nitrogenada e no momento mais adequado para realização do manejo químico dessa leguminosa.

Assim, este trabalho, em conjunto com outros trabalhos realizados no Sul do Brasil fornece subsídios para novas recomendações de adubação nitrogenada à cultura do arroz. Estabelecer novas recomendações de adubação nitrogenada para o arroz irrigado em sucessão a leguminosas hibernais, tal qual é realizado para a cultura do milho.

A presente pesquisa também pode fornecer subsídios para futuras pesquisas de campo em relação ao manejo químico da leguminosa hibernal e seus reflexos na disponibilização de nutrientes na solução do solo. Entretanto, é fundamental, realizar estudos com a adoção de trevo persa por médio-longo prazo (>5 anos) de cultivo e seus impactos nos compartimentos mais lábeis do

nitrogênio e da matéria orgânica do solo e os reflexos na nutrição, desenvolvimento e produtividade do arroz.

Da mesma forma, este trabalho fornece subsídios relevantes para o desenvolvimento de sistemas mais sustentáveis de produção orizícola, especialmente, em razão da forte escalada de doses de nitrogênio usadas na lavoura arrozeira e seus potenciais impactos no ambiente e nos custos de produção.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, J. A. de A.; AMADO, T. J. C.; SILVA, L. S. D.; SANTi, A.; WEBER, M. A. Decomposição da fitomassa de plantas de cobertura e liberação de nitrogênio em função da quantidade de resíduos aportada ao solo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, vol. 44, n. 5, p. 801-809, 2014.
- ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 12 p., 2001.
- ANGHINONI, I. & CARLOS, F. S. **O cenário para a diversificação**. Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. 1ed. Porto Alegre: Departamento de Solos - UFRGS, 2018, v. 1, p. 25-30.
- ARAMBURU, B. B. **Disponibilidade de nitrogênio no solo e produtividade de arroz irrigado sob fracionamento da adubação nitrogenada** – Trabalho de conclusão de dissertação (Mestre em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Curso de Pós-graduação em Agronomia, Santa Maria, 2018.
- BALOTA, E. L.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, vol. 77, n. 2, p. 137-145, 2004.
- BOENI, M.; ANGHINONI, I.; GENRO JUNIOR, S. A.; OSÓRIO FILHO, B. D. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: Instituto Rio Grandense do Arroz, Cachoeirinha, 2010.
- BORTOLINI, F.; MITTELMANN, A.; DA SILVA, J. L. S. BRS Resteiveiro: nova cultivar de inverno para solos hidromórficos. **Embrapa Clima Temperado- Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 8 p., 2012.
- BROOKES, P. C.; LANDMAN, A.; PRUDEN G.; JENKINSON, D. S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil biology and biochemistry**, v. 17, n. 6, p. 837-842, 1985.
- BURESH, R. J.; DE DATTA, S. K. Nitrogen dynamics and management in rice-legume cropping systems. *In: Advances in Agronomy*. Academic Press, vol. 45, p. 1-59, 1991.
- BURNS, R. G.; FOREST, J. L.; MARXSEN, J.; SINSABAUGH, R. L.; STROMBERGERE, M. E.; WALLENSTEIN, M. D.; WEINTRAUB, M. N.; ZOPPINI, A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013.

BYRNES, B. H.; Liquid fertilizers and nitrogen solutions. *In: International Fertilizer Development Center*. Fertilizer manual. Alabama: Kluwer Academic, p. 20- 44, 2000.

CAI, S.; PITTELKOW, C. M.; ZHAO, X.; WANG, S. Winter legume-rice rotations can reduce nitrogen pollution and carbon footprint while maintaining net ecosystem economic benefits. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 195, p 289-300, 2018.

CAMARGO, F.A.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 21, n. 4, p. 575-579, 1997.

CARÁMBULA, M. **Pasturas y Forrajes. Insumos, implantación y manejo de pasturas**. Tomo II. 1ª ed. Buenos Aires: Hemisferio Sur, 2003.

CARLOS, F. S. **Índices de qualidade do solo em sistemas de produção de arroz irrigado**. Trabalho de conclusão de tese (Doutor em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2017.

CARLOS, F. S.; DENARDIN, L. G. de O.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F; ROSSI, I.; BUCHAIN, M. P.; CEREZA, T.; CARMONA, F. de C.; CAMARGO, F. A. de O Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degradation & Development**, vol. 31, n.18, p. 2962-2972, 2020.

CARLOS, F. S.; SCHAFFER, N.; MARCOLIN, E.; FERNANDES, R. S.; MARIOT, R.; MAZZURANA, M.; ROESH, L. F. W.; LEVANDOSKI, B.; CAMARGO, F. A. de O. Long-term no-tillage system can increase enzymatic activity and maintain bacterial richness in paddy field. **Land Degradation & Development**, 2021.

CARMONA, F. de C.; ANGHINONI, I.; MEZZARI, C. P.; MARTINS, A. P.; CARVALHO, P. C. de F. Effectiveness of current fertilizer recommendations for irrigated rice in integrated crop-livestock systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 40, 2016.

CHEN, J.; QIN, W.; CHEN, X.; CAO, W.; QIAN, G.; LIU, J.; XU, C. Application of Chinese milk vetch affects rice yield and soil productivity in a subtropical double-rice cropping system. **Journal of Integrative Agriculture**. Vol.19, n. 8, p. 2116–2126, 2020.

CHEN, Z.; WANG, H.; LIU, X.; ZHAO, X.; LU, D.; ZHOU, J.; LI, C. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice–wheat cropping system. **Soil and Tillage Research**, vol. 165, p. 121-127, 2017.

CHENG P.; WANG, J.; LIU, T. Effects of nitrogen source and nitrogen supply model on the growth and hydrocarbon accumulation of immobilized biofilm cultivation of *B. braunii*. **Bioresource technology**, vol. 166, p. 527-533, 2014.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A Uniform, Objective, and Adaptive System for Expressing Rice Development. **Crop Science**, New York, v. 40, p. 436–443, 2000.

CQFS-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11ed. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2016. 401 p.

DA COSTA, N. L.; REIS, J. C. L.; RODRIGUES, R. C.; COELHO, R. W. Trevo persa uma forrageira de duplo propósito, **Embrapa Clima Temperado- Comunicado Técnico 116**, Pelotas, 3 p., 2005.

DEMOTES-MAINARD, S.; BOUMAZA, R.; MEYER, S.; CEROVIC, Z.G. (2008). Indicators of nitrogen status for ornamental woody plants based on optical measurements of leaf epidermal polyphenol and chlorophyll contents. **Scientia Horticulturae**, vol. 115, p. 377-385.

DOS SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; dos ANJOS, L. H. C.; de OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; de ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. de A.; de OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed., ver. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

DUARTE, G. D. S.; BILHARVA, M.; MITTELMANN, A.; LAGO, I.; PEDROSO, C. D. S. Componentes do rendimento de sementes de trevo persa submetido a diferentes épocas de semeadura e ao corte. *In* **Embrapa Gado de Leite-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. Chapecó, 2015.

FAGERIA, N. K. & BALIGAR, V. C. Lowland rice response to nitrogen fertilization. *Communications in: Soil Science and Plant Analysis*, v. 32, n. 9-10, p. 1405-1429, 2001.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos; STONE, L. F. Manejo de nitrogênio em arroz irrigado. **Embrapa Arroz e Feijão-Circular Técnica 58 (INFOTECA-E)**, 4 p., 2003.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, vol. 23, n. 4, p. 991-996, 1999.

FRAGA, T. I.; GENRO JUNIOR, S. A.; INDA JUNIOR, A. V.; ANGHINONI, I. Suprimento de potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos sucessivos de arroz irrigado. **Revista brasileira de ciência do solo**. Viçosa. Vol. 33, n. 3, p. 497-506, 2009.

GARCIA, A. V. **Uso de leguminosa hibernal (*Trifolium resupinatum*) e plantio direto na produção de arroz irrigado: respostas de solo e planta às modificações no ciclo do nitrogênio.** Trabalho de conclusão de mestrado (Mestre em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2020.

GOMES, A. da S.; PORTO, M. P.; PARFITT, J. M. B.; da SILVA, C. A. S.; de SOUZA, R. O.; PAULETTO, E. A. Rotação de culturas em áreas de várzea e plantio direto de arroz. **Embrapa Clima Temperado - Documentos 89 (INFOTECA-E)**, 65 p., 2002.

GOULART, F. A. P.; MARTINS, M. B.; SCHMITZ, M. F.; AGOSTINETTO, D.; ANDRES, A. Rotação de culturas e preparo do solo sobre o banco de sementes de plantas daninhas em terras baixas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, vol. 18, n. 4, 7 p., 2019.

GUBIANI, P. I.; MÜLLER, E. A.; SOMAVILLA, A.; ZWIRTES, A. L.; MULAZZANI, R. P.; MARCHESAN, E. Transpiration Reduction Factor and Soybean Yield in Low Land Soil with Ridge and Chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 14 p., 2018.

GUINET, M.; NICOLARDOT, B.; REVELLIN, C.; DUREY, V.; CARLSSON, G.; VOISIN, A. S. Comparative effect of inorganic N on plant growth and N₂ fixation of ten legume crops: towards a better understanding of the differential response among species. **Plant and Soil**, vol. 432, n. 1-2, p. 207-227, 2018.

HAEFELE, S.M.; BANAYO, N. P. M.; AMARANTE, S. T.; SIOPONGCO, J. D. L. C.; MABESA, R. L. Characteristics and management options for rice–maize systems in the Philippines. **Field Crops Research**, vol. 144, p. 52-61, 2013.

HARGROVE, W. L. Soil environmental and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions. *In*: BOCK, B.R.; KISSEL, D.E. Ed. **Ammonia volatilization from urea fertilizers**. Alabama; 1988, NFDC, TVA, cap. 2, p.17-36.

HERNANDES, A.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; ARF, O.; de SÁ, M. E. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em cultivares de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, vol. 34, n.2, p. 307-312, 2010.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ – IRGA 2019 **Boletim de resultados da lavoura - safra 2018/19 – arroz irrigado e soja em rotação –** Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/safras-2>> Acesso em: 24 dez. 2020.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ – IRGA 2019 **Área e produção de arroz.** Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/safras-2>> Acesso em: 23 dez. 2020.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA 2020 - **ARROZ RS - ÁREA x PRODUTIVIDADE** Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/safras-2>> Acesso em: 04 jan. 21.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA 2020 - **Boletim de resultados da lavoura – safra 2019/2020** Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/safras-2>> Acesso em 21 dez. 20.

JIANG, Z.; LIU, Y.; YANG, J.; BROOKES, P. C.; GUNINA, A. Rhizosphere priming regulates soil organic carbon and nitrogen mineralization: The significance of abiotic mechanisms. **Geoderma**, vol. 385, p. 114877, 2021.

KRITZLER, U. H. & JOHNSON, D. Mineralisation of carbon and plant uptake of phosphorus from microbially-derived organic matter in response to 19 years simulated nitrogen deposition. **Plant and soil**, vol. 326, n. 1, p. 311-319, 2010.

KROLOW, R. H.; MISTURA, C.; COELHO, R. W.; SIEWERDT, L.; ZONTA, É. P. Efeito do fósforo e do potássio sobre o desenvolvimento e a nodulação de três leguminosas anuais de estação fria. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33 n. 6, p. 2224-2230, 2004.

KRONZUCKER, H. J.; GLASS, A. D. M.; SIDDIQI, M. Y.; KIRK, G. J. Comparative kinetic analysis of ammonium and nitrate acquisition by tropical lowland rice: implications for rice cultivation and yield potential. **New Phytologist**, v. 145, n. 3, p. 471-476, 2000.

LADHA, J. K. & CHAKRABORTY, D. Nitrogen and Cereal Production: Opportunities for Enhanced Efficiency and Reduced N Losses. *In: International Nitrogen Initiative Conference, Solutions to Improve Nitrogen Use Efficiency for the World*. INI 2016, Melbourne, 2016.

LADHA, J. K.; TIROL-PADRE, A.; REDDY, C. K.; CASSMAN, K. G.; VERMA, S.; POWLSON, D. S.; VAN KESSEL, C.; Richter, D. de B.; CHAKRABORTY, D.; PATHAK, H. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice and wheat production systems. **Scientific reports**, vol. 6, n. 1, p. 1-9, 2016.

LIMA, G. G.; PIAS, O. H. de C.; MARTINS, A. P.; TIECHER, T.; CARMONA, F. de C. Produtividade e lucratividade de genótipos de arroz irrigado em relação a doses de nitrogênio e aplicação de fósforo e potássio. *Pesquisa Agropecuária Tropical* vol. 50, Goiânia, 2020.

LOBO JÚNIOR, M.; DE SOUZA, J. N. G.; SANTOS, A. B. dos Processos biológicos e densidade de microrganismos em solo de várzea tropical cultivado com forrageiras para implantação do arroz no sistema plantio direto. **Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado Técnico 89**, 6 p., 2004.

MARTINS A. P.; DENARDIN, L. G. de O.; BORIN, J. B. M.; CARLOS, F. S.; BARROS, T.; OZÓRIO, D. V. B.; CARMONA, F. de C.; ANGHINONI, I.; CAMARGO, F. A. de O.; CARVALHO, P. C. de F. Shortterm Impacts on Soil-quality Assessment in Alternative Land Uses of Traditional Paddy Fields in Southern Brazil. **Land Degradation & Development** vol. 28, n. 2, p. 534–542, 2017.

MCDANIEL, M. D. & GRANDY, A. S. Soil microbial biomass and function are altered by 12 years of crop rotation. **Soil**, Göttingen, v. 2, n. 4 p. 583–599, 2016.

MENEZES, V. G.; MARIOT, C. H. P.; LOPES, M. C. B; DA SILVA, P. R. F.; TEICHMANN, L. L. Semeadura direta de genótipos de arroz irrigado em sucessão a espécies de cobertura de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, vol. 36, n. 9, p. 1107-1115, 2001.

MIURA, A. K.; IRIBARREM, P. C.; CHAVES, R. D.; CUNHA, H. N. da; PRANKE, L. V. Discriminação e delimitação das terras baixas no Estado do Rio Grande do Sul: Primeira aproximação. **Embrapa Clima Temperado- Comunicado Técnico 313 (INFOTECA-E)**, 2015.

PAULETTO, E. A. et al. Manejo de solo e água em arroz irrigado. **Produção de sementes de arroz. Pelotas: Ed. da UFPel**, v. 1, p. 64-144, 1993.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. D. S.; TURATTI, A. L.; CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 709-715, 2001.

PEOPLES, M. B.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; HUGUENIN-ELIE, O.; JENSEN, E. S.; JUSTES, E.; WILLIAMS, M. The contributions of legumes to reducing the environmental risk of agricultural production. *In* **Agroecosystem diversity**, Academic Press, 2019, p. 123-143.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 35-40, 2004.

PINTO, L. F. S.; MIGUEL, P.; PAULETTO, E. A. Solos de várzeas e terras baixas. *In*: EMYGDIO, Beatriz Marti; ROSA, Ana Paula Schneid Afonso; OLIVEIRA, Ana Cláudia Barneche (Org.). **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. 1ed. Brasília: Embrapa, p. 23-44, 2017.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. *In*: **Advances in agronomy**. Academic Press, Vol. 24, p. 29-96, 1972.

REIS, José Carlos Leite. Origem e características de novos trevos adaptados ao Sul do Brasil -- **Pelotas: Embrapa Clima Temperado. Documentos, 184**, 2007. 27 p.

RIBAS, G. G.; ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; PILECCO, I. B.; de SOUZA, P. M.; HEINEMANN, A. B.; GRASSINI, P. Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil **Agricultural Systems**, Vol. 188, p., 2021.

- SCIVITTARO, W. B.; DA SILVA, C. A. S.; REIS, J. C. L.; MURAOKA, T.; TRIVELIN, P. C. O. **Potencial de fornecimento de nitrogênio (15N) de adubos verdes e mineral para o arroz irrigado**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento 21 (EMBRAPA), 24p., 2005.
- SCIVITTARO, W. B.; MATTOS, M. L. T.; MARTINS, J. F. da S. Uso de coberturas de solo como fonte de nitrogênio para sistema de produção orgânica de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 1, p. 1078-1081, 2007.
- SINGH, S. P.; PILLAI, K. G. Response of scented rice varieties to nitrogen. **Oryza**, v. 33, n. 3, p. 193-195, 1996.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI 2016 **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas, RS: SOSBAI, 2016.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI 2018 **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Porto Alegre, RS: SOSBAI, 2018, 205 p.
- SOUSA, R. O.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados (Reações redox). In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 4ª. Porto Alegre: Editora Evangraf, 2010. cap. 7, p. 171-196.
- SOUSA, Rogério Oliveira de. **Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais**. Trabalho de conclusão de tese (Doutor em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2001.
- SOUSA, R. O. de; BOHNEN, H.; MEURER, E. J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 26, n. 2, p. 343-348, 2002.
- SPARLING, G.P. & WEST, A.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C labelled cells. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 3, p. 337-343, 1988.
- STRECK, Edeimar Valdir et al.; FLORES, Carlos Alberto; SCHNEIDER, Paulo (Cibs.) **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed., rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2018. 252 p. il. color. ISBN 978-85-98842-20-2.
- STROUS, M.; VAN GERVEN, E.; ZHENG, P.; KUENEM, J. G.; JETTEN, M. S. Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in different reactor configurations. **Water Research**, v. 31, n. 8, p. 1955-1962, 1997.

TEDESCO, M. J., GIANELLO, G., BISSANI, C. A. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. rev. e ampliada. Porto Alegre-RS: Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 1995, 174p.

VELOSO, M. G.; ANGERS, D. A.; TIECHER, T.; GIACOMINI, S.; DIECKOW, J.; BAYER, C. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, vol. 268, p. 15-23, 2018.

VENTERINK, HARRY OLDE Legumes have a higher root phosphatase activity than other forbs, particularly under low inorganic P and N supply. *Plant and Soil*, vol. 347, n. 1, p.137-146, 2011.

VERNETTI JUNIOR, F. de J.; GOMES, A. da S.; SCHUCH, L. O. B. Sucessão de culturas em solos de várzea implantadas nos sistemas plantio direto e convencional. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 15, n. 1-4, p. 37-42, 2009 a.

VERNETTI JUNIOR, F. de J.; GOMES, A. da S.; SCHUCH, L. O. B. Sustentabilidade de sistemas de rotação e sucessão de culturas em solos de várzea no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 39, n. 6, p. 1708-1714, 2009 b.

VITOUSEK, P. M.; PORDER, S.; HOULTON, B. Z.; CHADWICK, O. A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen–phosphorus interactions. **Ecological applications**, vol. 20, n. 1, p. 5-15, 2010.

ZHAO, X.; WANG, S.; XING, G. Maintaining rice yield and reducing N pollution by substituting winter legume for wheat in a heavily-fertilized rice-based cropping system of southeast China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 202, p. 79-89, 2015.

ZHOU, G.; CAO, W.; BAI, J.; XU, C.; ZENG, N.; GAO, S.; REES, R. M.; DOU, F. Co-incorporation of rice straw and leguminous green manure can increase soil available nitrogen (N) and reduce carbon and N losses: An incubation study. **Pedosphere**, vol. 30, n. 5, p. 661–670, 2020.

ZHU, G. B.; SINGH, B.; ZHU, Y. G. Anaerobic ammonium oxidation in agricultural soils-synthesis and prospective. **Environmental pollution**, vol. 244, p. 127-134, 2019.