

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

**RESPOSTAS DO SOLO E DO ARROZ IRRIGADO AO PLANTIO DIRETO E
AO CULTIVO DE LEGUMINOSA HIBERNAL APÓS QUATRO ANOS**

Luciano Pinzon Brauwere
(Dissertação de mestrado)

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

**RESPOSTAS DO SOLO E DO ARROZ IRRIGADO AO PLANTIO DIRETO E
AO CULTIVO DE LEGUMINOSA HIBERNAL APÓS QUATRO ANOS**

Luciano Pinzon Brauwerts
Engenheiro-Agrônomo (UFRGS)

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

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Pinzon Brauers, Luciano
RESPOSTAS DO SOLO E DO ARROZ IRRIGADO AO PLANTIO
DIRETO E AO CULTIVO DE LEGUMINOSA HIBERNAL APÓS QUATRO
ANOS / Luciano Pinzon Brauers. -- 2023.
66 f.
Orientadora: Amanda Posselt Martins.

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

1. Fertilidade do Solo. 2. Terras baixas. 3. Arroz
irrigado. 4. Plantio direto. I. Posselt Martins,
Amanda, orient. II. Título.

Dissertação

submetida como parte dos requisitos

para a obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Faculdade de Agronomia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em: ____/____/____
Pela Banca Examinadora

Homologado em: ____/____/____
Por

AMANDA POSSELT MARTINS
Orientador-Departamento de
Solos/UFRGS

ALBERTO VASCONCELLOS INDA
JUNIOR
Coordenador do Programa de Pós-
graduação em Ciência do Solo

CIMÉLIO BAYER
Departamento de Solos/UFRGS

FABIANE VEZZANI
Departamento de Solos e
Engenharia Agrícola/UFPR

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de Agronomia

LEANDRO SOUZA DA SILVA
Departamento de Solos/UFMS

“Águas de Março

*É o pau, é a pedra, é o fim do caminho
É um resto de toco, é um pouco sozinho
É um caco de vidro, é a vida, é o sol
É a noite, é a morte, é um laço, é o anzol
É peroba no campo, é o nó da madeira
Caingá candeia, é o matita-pereira
É madeira de vento, tombo da ribanceira
É o mistério profundo, é o queira ou não queira
É o vento vetando, é o fim da ladeira
É a viga, é o vão, festa da ciumeira
É a chuva chovendo, é conversa ribeira
Das águas de março, é o fim da canseira
É o pé, é o chão, é a marcha estradeira
Passarinho na mão, pedra de a tiradeira
É uma ave no céu, é uma ave no chão
É um regato, é uma fonte, é um pedaço de pão
É o fundo do poço, é o fim do caminho
No rosto um desgosto, é um pouco sozinho
É um estepe, é um prego, é uma conta, é um conto
É um pingo pingando, é uma conta, é um ponto
É um peixe, é um gesto, é uma prata brilhando
É a luz da manhã, é o tijolo chegando
É a lenha, é o dia, é o fim da picada
É a garrafa de cana, o estilhaço na estrada
É o projeto da casa, é o corpo na cama
É o carro enguiçado, é a lama, é a lama
É um passo, é uma ponte, é um sapo, é uma rã
É um resto de mato na luz da manhã
São as águas de março fechando o verão
É a promessa de vida no teu coração
É uma cobra, é um pau, é João, é José
É um espinho na mão, é um corte no pé
São as águas de março fechando o verão
É a promessa de vida no teu coração
É pau, é pedra, é o fim do caminho
É um resto de toco, é um pouco sozinho
É um passo, é uma ponte, é um sapo, é uma rã
É um belo horizonte, é uma febre terça
São as águas de março fechando o verão
É a promessa de vida no teu coração”*

Tom Jobim, 1972.

Dedico este trabalho para Lóren,
minha companheira de outras vidas.

AGRADECIMENTOS

Este não é um agradecimento convencional, pois de convencional já chega o monocultivo deste trabalho. Este é um agradecimento oculto, do tipo que só os que foram e voltaram que sabem; além disso, “agradecimentos” é diferente de “lista de presença”. Aos citados ocultamente aqui, não esperem que eu faça um agradecimento tradicional ou relação de causa e efeito pois isso seria diminuir, através das minhas palavras, o nosso relacionamento. Você que está lendo, se já compartilhamos um pouco de tesão pela vida, você se inclui aqui neste pequeno agradecimento, e eu sou muito grato por isso.

A minha (des)construção pessoal e profissional passou por relações químicas, físicas e biológicas com vocês. E, no caos dessas relações, foi muito bom ter vivido com amigos, que de forma similar a agentes cimentantes e hifas de fungos, me estabilizaram nesta fase inicial.

Com carinho e com uns cabelos brancos a mais,
Luciano Pinzon Brauwens.

RESPOSTAS DO SOLO E DO ARROZ IRRIGADO AO PLANTIO DIRETO E AO CULTIVO DE LEGUMINOSA HIBERNAL APÓS QUATRO ANOS¹

Autor: Eng. Agr. Luciano Pinzon Brauwers
Orientador: Profa. Dra. Amanda Posselt Martins

RESUMO

Os solos de terras baixas no sul do Brasil são majoritariamente cultivados com a cultura do arroz irrigado em sistemas de monocultivo com pousio no inverno, em grande parte com uso do preparo de solo. A adoção de práticas conservacionistas do solo, como o plantio direto (PD), é importante para a sustentabilidade socioeconômica e ambiental das terras baixas. O objetivo deste estudo foi avaliar a resposta de atributos químicos e físicos do solo, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm, e atributos biológicos do solo, na camada de 0-10 cm, em um Planossolo Háplico, e a produtividade do arroz irrigado após quatro anos da adoção de três sistemas de monocultivo de arroz irrigado: (I) Pousio no inverno e preparo de solo com lavração e gradagem no verão; (II) Pousio no inverno e arroz irrigado em PD no verão; e (III) trevo-persa como planta de cobertura no inverno e PD do arroz irrigado no verão. A coleta de solo ocorreu em outubro de 2021, antecedendo a semeadura da quarta safra de arroz irrigado. Os atributos biológicos respiração basal diária, carbono da biomassa microbiana e nitrogênio da matéria orgânica particulada do solo foram beneficiados pelo PD e pelo trevo-persa como planta de cobertura. O PD com trevo persa como planta de cobertura aumentaram os valores de umidade gravimétrica e volumétrica (0-5 cm), a densidade (5-10 cm) e a resistência à penetração do solo (5-10 e 10-20 cm), mas não houve resposta dos atributos físicos ligados à estrutura do solo, bem como não houve indícios de compactação do solo. Houve ausência de resposta dos tratamentos avaliados quanto aos atributos químicos do solo. Portanto, em áreas de terras baixas e com longo histórico de preparo com revolvimento intensivo do solo, após curto prazo de adoção do PD com uso de trevo-persa como planta de cobertura hiberna ocorreram apenas melhoria em alguns atributos biológicos e físicos do solo, mas com ausência de resposta nos atributos químicos do solo e na produtividade do arroz irrigado nas quatro safras avaliadas.

Palavras-chave: terras baixas, manejo do solo, sucessão de culturas.

¹Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (67p.) Março, 2023.

SOIL AND FLOODED RICE RESPONSES TO NO-TILL AND HIBERNAL LEGUME CULTIVATION AFTER FOUR YEARS ²

Author: Luciano Pinzon Brauwers
Adviser: Amanda Posselt Martins

ABSTRACT

Lowland soils in southern Brazil are predominantly cultivated with irrigated rice in monocropping systems with fallow in the winter, largely employing soil tillage. The adoption of soil conservation practices, such as no-tillage (NT), is essential for the socioeconomic and environmental sustainability of lowlands. The aim of this study was to assess the response of soil chemical and physical attributes in the 0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm layers, as well as soil biological attributes in the 0-10 cm layer, in a Albaqualf soil, and the irrigated rice productivity, after four years of adopting three irrigated rice monocropping systems: (I) Winter fallow and soil tillage with plowing and harrowing in the summer; (II) Winter fallow and irrigated rice under NT in the summer; and (III) Persian clover as a winter cover crop and NT for irrigated rice in the summer. Soil sampling was conducted in October 2021, preceding the sowing of the fourth irrigated rice crop. The biological attributes, daily basal respiration, microbial biomass carbon, and particulate organic matter nitrogen, benefited from NT and Persian clover as a cover crop. NT with Persian clover as a cover crop increased gravimetric and volumetric moisture content values (0-5 cm), bulk density (5-10 cm), and soil penetration resistance (5-10 and 10-20 cm), but there was no response in soil structure-related physical attributes, and no signs of soil compaction were observed. There was no response in the evaluated treatments regarding soil chemical attributes. Therefore, in lowland areas with a long history of intensive soil tillage, after a short-term adoption of NT with the use of Persian clover as a winter cover crop, improvements were observed in some soil biological and physical attributes, but there was no response in soil chemical attributes and irrigated rice productivity over the four evaluated crops.

Keywords: lowlands, soil management, crop succession.

²M.Sc. Dissertation in Soil Science – Graduate Program in Soil Science, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (67p) Março, 2023.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul: histórico e ambiente	5
2.2. Plantio direto em terras baixas	7
2.3. Cultivo de leguminosas como planta de cobertura	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Localização geográfica, clima, solo e histórico da área	14
3.2. Tratamentos e delineamento experimental	16
3.3. Condução da lavoura de arroz irrigado.....	17
3.4. Amostragem do arroz irrigado para produtividade.....	19
3.5. Condução do período hibernaral	19
3.6. Estimativa da produção de resíduos vegetais pelo arroz irrigado e pelas plantas do período hibernaral	20
3.7. Coleta de atributos biológicos, físicos e químicos do solo.....	20
3.8. Análise estatística dos dados	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1. Produtividade do arroz irrigado e de plantas hibernarais	24
4.2. Atributos biológicos do solo	29
4.3. Atributos físicos do solo.....	33
4.4. Atributos químicos do solo	37
5. CONCLUSÕES	42
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
7. APÊNDICES	48

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Teores de areia, silte e argila do Planossolo Háplico da área experimental. Capivari do Sul/RS-Brasil.	15
Tabela 2. Atributos químicos do solo em pré-implantação da área experimental, março de 2018. Capivari do Sul/RS-Brasil.	16
Tabela 3. Cronosequência de cultivo por ano e época dos tratamentos com as variáveis de manejo do solo utilizadas no experimento. Capivari do Sul/RS-Brasil.	17
Tabela 4. Cultivares de arroz irrigado, densidade de semeadura, data de semeadura e data de colheita nos diferentes tratamentos e anos de avaliação do experimento. Capivari do Sul/RS-Brasil.	18
Tabela 5. Produção de resíduos da parte aérea, raízes e soma da parte aérea e raízes do arroz irrigado da safra 2018/19 até 2021/22 e média de quatro anos nos tratamentos avaliados em um planossolo háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil.	26
Tabela 6. Teores de nitrogênio (N-BMS), relação carbono e nitrogênio (Relação C:N-BMS) e quociente metabólico (qCO_2) da biomassa microbiana do solo em um Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil.....	31

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Levantamento da área de cultivo de arroz irrigado em diferentes manejos de preparo do solo da safra de 2017/2018 até 2021/2022. Fonte: IRGA (2023)	10
Figura 2. Diagrama conceitual de um macroagregado do solo. Adaptado de Jastrow & Miler (1998).	10
Figura 3. Pluviosidade média mensal e temperatura média mensal e pluviosidade e temperatura média mensal de 30 anos (INMET, 2021).	14
Figura 4. Produtividade de grãos do arroz irrigado de 2019 até 2022 e média dos 4 anos em diferentes sistemas de produção em monocultivo em um Planossolo Háplico.	24
Figura 6. Produção de resíduos, em matéria seca (MS), do resíduo da parte aérea e das raízes no período hibernal por diferentes tratamentos nos invernos de 2018 e 2019 em um Planossolo Háplico.....	27
Figura 7. Produção de resíduos em matéria seca (MS) do arroz irrigado e do período hibernal em diferentes tratamentos em monocultivo de arroz irrigado em um Planossolo Háplico	28
Figura 8. Respiração basal (C-CO ₂) (A) e carbono da biomassa microbiana (C-BMS) (B) de Planossolo Háplico após 3,5 anos de adoção de diferentes sistemas de produção de arroz irrigado.....	30
Figura 10. Carbono orgânico total (A), nitrogênio total (B), carbono orgânico particulado (C), nitrogênio da matéria orgânica particulada (D) e carbono orgânico associado aos mineiras do solo (E) em diferentes tratamentos e camadas de solo em um planossolo háplico	32
Figura 11. Umidade gravimétrica (A) e volumétrica do solo (B) no momento da coleta de solo após 3,5 anos de adoção de diferentes sistemas de produção de arroz irrigado em Planossolo Háplico	33
Figura 12. Densidade (A), porosidade total (B) e resistência à penetração (C) do solo em diferentes sistemas de produção de arroz irrigado após 3,5 anos de sua adoção em Planossolo Háplico.....	34
Figura 13. Diâmetro médio ponderado (DMP) por via seca (A) e via úmida (B), macro e microagregados por via seca (C) e via úmida (D) e índice de estabilidade de agregados (E) do solo após 3,5 anos de adoção em um Planossolo Háplico	36
Figura 15. Valores de pH (em água, relação 1:1) (A), acidez potencial (H+Al) (B) e cálcio (Ca) (C), magnésio (Mg) (D) e alumínio (Al) (E) trocáveis (KCl 1 mol L ⁻¹) no solo, independentemente do sistema de produção de arroz irrigado, após 3,5 anos de sua adoção em Planossolo Háplico	38

Figura 16. Teores de fósforo (P) (A) e potássio (K) (B) disponíveis (Mehlich 1) no solo, independentemente do sistema de produção de arroz irrigado, após 3,5 anos de sua adoção em Planossolo Háplico 39

Figura 17. Valores de CTC efetiva (A), CTC pH 7,0 (B), saturação por cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K) (C) e saturação por alumínio (Al) (D), independentemente do sistema de produção de arroz irrigado, após 3,5 anos de sua adoção em Planossolo Háplico 40

1. INTRODUÇÃO

No Sul do Brasil, mais especificamente nos Estados do Rio Grande do Sul (RS) e de Santa Catarina (SC) é onde ocorre a produção de aproximadamente 80,9% do total de arroz do Brasil, com grande participação (71,3%) do RS na produção brasileira para consumo interno (IBGE, 2023). Em 2020, o consumo alimentar de arroz pela população brasileira era de 32 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹, abaixo da média mundial de 54 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹. Ainda em 2020, a produção total de arroz pelo RS foi de 7.753.663 toneladas, produzindo acima do consumo anual interno total do Brasil, e assim classificando o país como o 10° produtor e consumidor mundial e 9° exportador mundial de arroz (ETENE, 2021) . Ou seja, o Brasil tem o RS como seu principal estado produtor de arroz, um alimento básico e de difícil substituição na cesta básica brasileira.

Além de sua importância central como alimento na cesta básica, cabe ressaltar as oportunidades e as alternativas que a cadeia produtiva orizícola apresenta. Primeiramente, no consumo em grão, o qual apresenta diferente genótipos (arroz branco, arroz vermelho, arroz selvagem etc.) e classificações na sua industrialização (tipo branco, parboilizado, integral etc.), além de diversos subprodutos da sua cadeia produtiva, que vão desde a elaboração de produtos biodegradáveis (embalagens produzidas a partir da pálea e a lema) até a alimentação animal (farelo de arroz, grãos quebrados). Nos últimos anos, produtores orizícolas também tem destacado a qualidade do arroz gaúcho através da criação de selos de indicação geográfica, como é o caso da Associação dos Produtores da Planície Costeira Externa no RS (Nabinger e Sant' Anna, 2022); assim com a produção agroecológica e orgânica de arroz irrigado, a qual o RS é líder na América Latina (IRGA, 2021) .

No RS, a cultura do arroz irrigado é cultivada em uma área média anual de aproximadamente 1 milhão de hectares, com tendência nos últimos anos de redução na sua área semeada devido à expansão da cultura da soja, a qual 62% do total produzido no Brasil é para exportação (CONAB, 2023). A área de terras baixas no RS é cerca de 6 milhões de hectares, aproximadamente 20,5% da sua área total, onde cerca 5 milhões de hectares estão sob solos hidromórficos.

Diante do tamanho da área de arroz irrigado e terras baixas do RS, cabe aqui ressaltar as características dos sistemas de cultivo de arroz irrigado no RS. Aproximadamente 16% da área de terras baixas do RS é cultivada anualmente com arroz irrigado. No caso da fronteira oeste do RS, a restrição hídrica para a irrigação por inundação/alagamento do arroz é mais severa, o que faz com que produtores orizícolas alternem um ano com cultivo de arroz irrigado com 3-4 anos de pecuária extensiva. Porém, em muitas áreas do RS, o arroz irrigado é cultivado anualmente em sistema de monocultivo, em grande parte com pousio no inverno. Durante décadas, esse sistema de monocultivo foi e ainda é realizado com preparo de solo, muitas vezes em mais de duas épocas no ano. O principal fator de formação dos solos de terras baixas é a sedimentação eluvial de granito, como é o caso dos Planossolos (Streck et al., 2018). Esse processo de formação faz com que os solos de terras baixas apresentem baixos teores de matéria orgânica e baixa capacidade de troca de cátions (CTC). E com o revolvimento do solo para homogeneização do relevo para o cultivo do arroz irrigado fizeram com que grande parte das áreas de terras baixas fossem degradadas, impactando na funcionalidade dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo para a finalidade da produção de alimentos.

Ao contrário das terras altas ou de coxilha do RS, que desde a década de 1970 se iniciou a introdução de práticas conservacionistas de manejo do solo, como o não revolvimento do solo, a semeadura direta na palhada de plantas de cobertura e a rotação de culturas, configurando o que denominamos hoje de sistema plantio direto (SPD), nas terras baixas o uso dessas práticas é recente. Em 2012, houve um marco da pesquisa de produção de arroz irrigado em terras baixas com a publicação do boletim técnico “Projeto 10”, pelo Instituto Rio Grandense do Arroz (Projeto 10 - IRGA, 2012). O intuito do boletim era trazer os resultados do “Projeto 10”, iniciado em 2004, e a difusão de boas práticas agrícolas para a produção de arroz irrigado no RS, abordando principalmente aspectos ligados às práticas culturais do arroz irrigado (época de semeadura, adubação, manejo da irrigação etc.). O objetivo era aumentar a produtividade média de grãos da lavoura orizícola para 10 t ha^{-1} , mas sem menções a práticas conservacionistas de manejo do solo. Estas práticas agrícolas básicas foram de suma importância, onde em propriedades rurais atendidas pelo projeto, a

produtividade de grãos do arroz irrigado era de 9,45 t ha⁻¹ em 2012, sendo que a média do RS na mesma época era de 7,68 t ha⁻¹.

Neste contexto, e mesmo sem a adoção de práticas conservacionistas em larga escala, a produtividade média de grãos das lavouras de arroz do RS passou de 6,68 t ha⁻¹ em 2004 para 9,01 t ha⁻¹ em 2021. Contudo, com este aumento da produtividade por hectare, houve um aumento similar ou maior durante estes anos no custo da lavoura orizícola. Esse aumento foi ligado principalmente ao aumento nos preços de insumos agrícolas ligados a nutrição de plantas e sanidade vegetal, diminuindo a lucratividade dos produtores orizícolas. Além disso, atualmente grande parte da área destinada à produção de arroz irrigado é arrendada (Carmona et al., 2018), o que muitas vezes causa receio em produtores orizícolas para investir em práticas conservacionistas de manejo de solo, cujas respostas tendem a ser de médio a longo prazo. E justamente, devido a respostas em médio e longo prazo, que é necessário a demonstração dos ganhos em curto prazo da adoção do plantio direto no atual cenário produtivo de monocultivo de arroz irrigado em terras baixas. Tal cenário deve ser repensado, visto a continuidade e a importância social e econômica da cultura do arroz irrigado para a sociedade brasileira e o ambiente produtivo em terras baixas.

Neste cenário, trabalhos de pesquisa regionais e internacionais de médio e longo prazo na cultura do arroz irrigado têm apontado para vários benefícios da adoção do plantio direto em terras baixas, tanto em sistemas de monocultivo como de rotação de culturas (Carmona et al., 2018). Mas a resposta do arroz irrigado tem variado conforme a cultura antecedente e o tempo de adoção do plantio direto. Porém, somente nos últimos anos tem se destacado a pesquisa com a introdução de leguminosas em sucessão ao arroz irrigado em sistema de plantio direto (Garcia, 2020; Weinert et al., 2023). O sistema de cultivo de gramíneas e leguminosas em sucessão ou rotação é algo antigo, com uma base sólida de benefícios, e pouco explorado atualmente nas terras baixas do RS. No caso de sistemas de monocultivo de arroz irrigado, existem principalmente leguminosas hibernais do gênero *Trifolium*, tais como trevo-branco, trevo-vermelho e trevo-persa, como alternativas de plantas de cobertura ou para pastejo, em sucessão ao arroz irrigado.

O uso conjunto da prática do plantio direto e do uso de leguminosa como cobertura hiberna alteram o fluxo de energia e nutrientes no solo. O revolvimento do solo expõe o solo a radiação solar. O aquecimento excessivo do solo estimula a degradação de compostos orgânicos pela atividade microbiana do solo. Conseqüentemente, diminuindo a entrada e permanência destes no solo. Assim, grande parte desses resíduos e compostos orgânicos, que são importantes como agentes cimentantes entre partículas orgânicas e minerais do solo para a formação de agregados no solo, são perdidos através de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), para a atmosfera. Neste quesito, a passagem de um sistema com revolvimento do solo para o plantio direto, diminui as taxas de degradação do solo.

Contudo o uso contínuo de pousio no período hiberna condiz com uma baixa entrada de resíduos orgânicos ao sistema. O aporte constante de resíduos orgânicos, pelo uso de uma planta de cobertura por exemplo, possibilita a cobertura do solo por palhada, a qual é importante para a proteção do solo do efeito erosivo da chuva. Além disso, o aporte constante de resíduos orgânicos serve como energia para os processos ecológicos do solo e como fonte de nutrientes para as plantas através da ciclagem ou reciclagem destes. Diante disso, o uso de uma planta leguminosa em sucessão ao arroz irrigado em plantio direto atua na diminuição das taxas de decomposição dos resíduos orgânicos e no aumento do aporte de resíduos ao solo. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar o efeito de curto prazo, quatro anos, da adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo em sistemas de monocultivo de arroz irrigado em atributos químicos, físicos e biológicos do solo e a produtividade do arroz irrigado e das plantas do período hiberna. A hipótese deste trabalho é que a adoção do plantio direto com o trevo-persa como planta de cobertura hiberna aumente a produtividade do arroz irrigado e que os atributos biológicos, físicos e químicos do solo apresentem melhorias em curto prazo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul: histórico e ambiente

O arroz é conhecido internacionalmente como um alimento básico para diferentes culturas e povos ao longo da história da agricultura. Sua domesticação é datada ao redor do ano 3.000 a.C. e é tida como de grande importância para o desenvolvimento socioeconômico asiático e mediterrâneo, pois além de seu uso como alimento, o arroz também era utilizado como moeda de troca. A chegada do arroz no Brasil ocorreu por volta de 1587, na Bahia, por portugueses. No entanto, alguns historiadores apontam que a sua introdução na América do Sul não foi realizada diretamente por europeus, mas sim por pessoas oriundas do continente africano e que foram escravizadas durante o período de tráfico humano ocorrido no Brasil (Carney e Watkins, 2021). Além disso, a disseminação do famoso prato da alimentação atual dos brasileiros, composto por arroz e feijão, também ocorreu justamente pela influência da cultura africana.

Embora introduzido na Bahia no século XV, o crescimento da cadeia produtiva do arroz no Brasil ocorreu historicamente nas terras baixas de SC e, principalmente, do RS. De forma similar ao sistema de cultivo dos países asiáticos e mediterrâneos, o arroz cultivado no RS e em SC é, desde o início, majoritariamente irrigado através de inundação, deixando uma lâmina d'água sobre o solo durante o seu ciclo de cultivo. A irrigação por inundação, por sua vez, exige a homogeneização do nível do solo para controle e manutenção da lâmina d'água. Para nivelamento do solo, há a necessidade de sua mobilização, com operações de preparo que se utilizam de implementos agrícolas como arados e grades, o qual necessita de elevada mão de obra. No histórico da cultura no RS, há registros que entre 1921 e 1931 havia uma área de aproximadamente 100 mil ha destinados ao cultivo do arroz irrigado, com produtividade média de 2.200 kg ha⁻¹. Na safra de 2014/2015 no RS, quase um século depois, ocorreu a maior área já registrada com o cultivo de arroz irrigado, que foi de aproximadamente 1,13 milhões de ha, com produtividade média de 7.780 kg ha⁻¹ (IRGA, 2023).

As terras baixas, onde o arroz é cultivado no RS, são caracterizadas por ambientes com algum grau de alagamento durante o ano. Grande parte dos solos de terras baixas são formados através da deposição de sedimentos aluviais de granito, predominando uma textura franco arenosa (Streck et al., 2018). Os solos das terras baixas do RS são majoritariamente da classe dos Planossolos (57%), Chernossolos (12%) e dos Gleissolos (7%). Dentre estes solos, o de maior abrangência e pesquisa com a cultura do arroz irrigado é a classe dos Planossolos.

Os horizontes que compõem o perfil de solo dos Planossolos são: A-E-Bt-C; onde A é um horizonte de cor escura devido ao alagamento e deposição de matéria orgânica, E é um horizonte arenoso, Bt é um horizonte com mudança abrupta de textura, com maior concentração de argila, e C um horizonte mais próximo do material de origem, em que este pode ou não estar presente. Quanto ao relevo das terras baixas, este é de suave ondulado praticamente plano, com mínima inclinação ($0,01 \text{ m m}^{-1}$), majoritariamente próximo de cursos d'água, lagoas e lagunas. A disposição do Planossolo na paisagem, juntamente com suas características dos horizontes anteriormente descritas e possibilidade de alagamento durante alguma parte do ano, fazem com que ocorra uma limitação quanto à diversificação de cultivos agrícolas nas terras baixas, havendo preferência e aptidão das terras para o cultivo do arroz irrigado.

O início do cultivo do arroz irrigado no RS (ano de 1921), até a presente data deste trabalho (ano de 2023), é marcado pelo revolvimento do solo. Com quase um século de cultivo no RS, é possível concluir que há áreas com décadas de degradação do solo devido ao preparo do solo com arações e gradagens, e ao baixo aporte de resíduos orgânicos em áreas de arroz irrigado. No que diz respeito à fertilidade natural dos solos de terras baixas, há grande diferença dentre eles, devido à variação dos fatores de formação dos solos nas regiões fisiográficas do RS. Do ponto de vista ecológico, as terras baixas apresentam uma função de regulação fluvial, com fauna e flora adaptadas a essas condições.

Na sua função histórica produtiva, as terras baixas marcadas pela expansão do monocultivo do arroz irrigado com revolvimento do solo, tiveram e tem grande importância social e econômica para o Brasil. Atualmente, o RS é o maior produtor de arroz irrigado do país. Sua produção é destinada

majoritariamente para consumo interno, com expressivo consumo entre a população brasileira de classes sociais mais baixas, devido ao seu valor monetário, e de genuína e diversa utilidade gastronômica. Anos consecutivos de monocultivo de arroz em terras baixas provocaram a degradação química, física e biológica dos solos dessas áreas (Zang et al., 2022). Ainda, a filosofia de adubação do arroz irrigado não pressupõe aumento dos teores de nutrientes no solo, ao contrário das demais culturas de grãos (CQFS-RS/SC 2016). Contudo, no quesito de atributos biológicos do solo, principalmente o carbono do solo, que catalisa grande parte das reações químicas dos nutrientes no solo e atua na estruturação física do solo, foram os que sofreram maior degradação em relação ao seu estado natural (Zang et al., 2022). Conforme Boeni et al. (2010) de 2003 a 2008, aproximadamente 75% das amostras de solo das áreas de terras baixas do RS analisadas pelo laboratório de análises de solo do IRGA, de um total de 30.972 amostras, apresentavam um teor de matéria orgânica menor que 2,5%, o que garante pequeno suprimento de nitrogênio para a cultura do arroz irrigado (Sosbai, 2018).

2.2. Plantio direto em terras baixas

Tradicionalmente, o revolvimento do solo em sistemas de produção de arroz irrigado ocorre com a finalidade de incorporação de restos culturais ou de fertilizantes, de facilitar a emergência das plântulas de arroz ou de destorroar e nivelar partes do solo da lavoura que foram movimentadas devido à colheita do arroz em condições de maior umidade do solo. Esta última finalidade é, segundo Carmona et al. (2018), o maior desafio para a adoção do plantio direto em terras baixas. A colheita do arroz irrigado em uma consistência do solo de ligeiramente dura a dura diminuiria a necessidade de posterior nivelamento do solo. O nivelamento do solo se faz necessário para uma lâmina homogênea de irrigação durante o ciclo do arroz irrigado. Anos consecutivos de nivelamento e translocação de solo aumentam a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, pois pode haver locais que houve transposição de horizontes superficiais de solo e locais onde se retirou solo até seus horizontes subsuperficiais. Essa translocação de solo expõe horizontes subsuperficiais de

menor fertilidade do solo e aumenta a degradação de horizontes superficiais (Parfitt et al., 2009).

O processo dissipativo causado pelo revolvimento e nivelamento do solo tem um impacto direto no solo e a resposta dos cultivos. O principal impacto do revolvimento do solo é o aumento da taxa de decomposição de material orgânico e conseqüentemente ruptura de estruturas que protegem a matéria orgânica do solo da decomposição microbiana (Silva & Mielniczuk, 1997; Salton et al., 2008). Por isso, vislumbrando uma produção de arroz que seja economicamente, ambientalmente e socialmente mais sustentável nas terras baixas do RS, é necessária a adoção de sistemas de manejo do solo que atuem na formação de estruturas de proteção dos compostos orgânicos no solo e na capacidade de gerar entrada de carbono para organização da estrutura do solo através da produção primária de resíduos vegetais da parte aérea e de raízes de plantas.

Diante disso, assim como para terras altas, a adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo, como o não revolvimento do solo e o alto aporte e diversidade de material vegetal e cobertura do solo, devem ser priorizados. E parte dessa necessidade da adoção de práticas conservacionistas está ligada majoritariamente a ciclagem de nutrientes para o arroz irrigado, do que a questão histórica de erosão do solo em terras altas. Atualmente a maior parte (70%) da produção da cadeia orizícola ocorre em áreas arrendadas (Brandão et al., 2018). Isso faz com que a diversificação de cultivos em áreas de terras baixas seja dificultada, e as áreas conduzidas em monocultivo de arroz irrigado tem aumentado, especialmente após o advento de cultivares mutagênicas que são resistentes a determinados grupos de herbicidas. Nesse contexto, novas alternativas para tornar a produção de arroz irrigado mais sustentável devem ser apresentadas, mesmo que em monocultivo.

Dentre as alternativas, o não revolvimento do solo e o plantio direto em sistemas de produção de arroz irrigado podem ser considerados um avanço pelo aumento dos processos ordenativos, de perda de energia do solo. O acúmulo de material na superfície do solo diminui a incidência de radiação solar diretamente sobre ele, mantendo a temperatura do solo mais baixa e com menor amplitude (diferença entre máxima e mínima) e maiores teores de água em camadas superficiais. A diminuição na amplitude do teor de água e da temperatura do solo

possibilitam que a atividade microbiologia do solo possa se restabelecer e aumentar sua biomassa e diversidade funcional. Contudo, o acúmulo de um único tipo resíduo na superfície do solo, proveniente da cultura do arroz irrigado e que apresenta alta relação C:N e teor de lignina, imobiliza nutrientes na biomassa microbiana do solo, principalmente nitrogênio, o qual é requerido em grande quantidade para o crescimento e o desenvolvimento das plantas de arroz irrigado e apresenta relação direta com a produtividade de grãos (Freitas et al., 2008).

Sousa et al. (2021) contextualizam que por cerca de 1980 a iniciativa de adoção do uso do plantio direto em terras baixas ocorreu por parte de pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Os primeiros relatos da adoção do plantio direto em terras baixas do RS traziam resultados positivos quanto à diminuição do custo de produção, mesmo sem aumento de produtividade. E apesar da posterior iniciativa, em 1985, de produtores rurais em utilizar o plantio direto e difundi-lo através de dias de campos, o preparo do solo (que ocorre nos sistemas de cultivo mínimo, convencional e pré-germinado) ainda é realizado na maior parte das áreas cultivadas com arroz irrigado no RS (**Figura 1**).

Em terras altas ou coxilhas, na região subtropical do Brasil, a adoção do plantio direto tende a alcançar níveis de organização no solo comparáveis à vegetação nativa (Zanatta et al., 2019). O solo passa por diferentes fases de organização, em que ocorrem interações entre argilominerais e compostos orgânicos do solo. Os resíduos vegetais são decompostos por ação microbiana, liberando compostos orgânicos (agentes cimentantes) que juntamente de hifas de fungos formam estruturas denominadas microagregados. Em maior hierarquia de organização, ocorrem a formação de macroagregados (**Figura 2**).

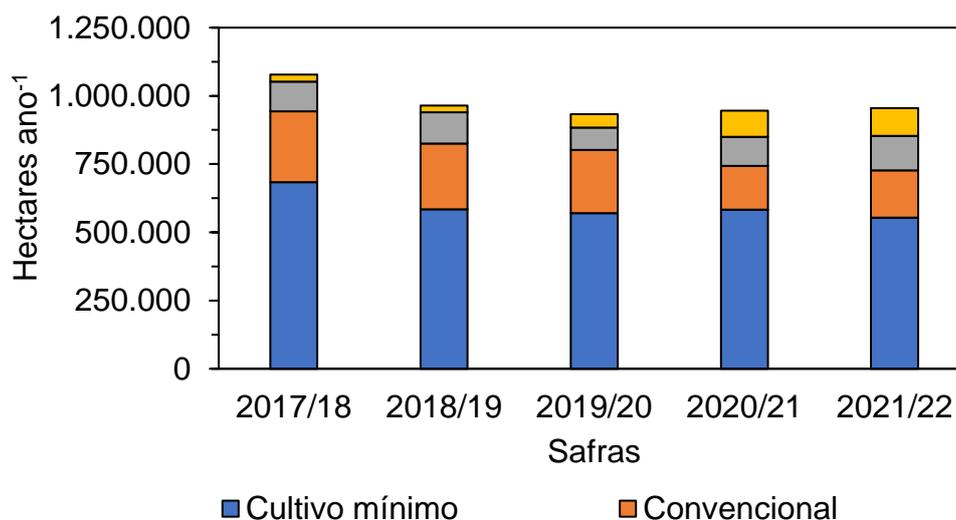


Figura 1. Levantamento da área de cultivo de arroz irrigado em diferentes manejos de preparo do solo da safra de 2017/2018 até 2021/2022. Fonte: IRGA (2023). Cultivo mínimo – preparo do solo de verão em 30 a 60 antes da semeadura do arroz irrigado; Convencional – preparo do solo pós-colheita do arroz irrigado e em pré-semeadura; Pré-germinado – preparo do solo utilizando lâmina d’água na superfície para posterior semeadura do arroz irrigado; Plantio direto – semeadura do arroz irrigado sob resíduos vegetais.

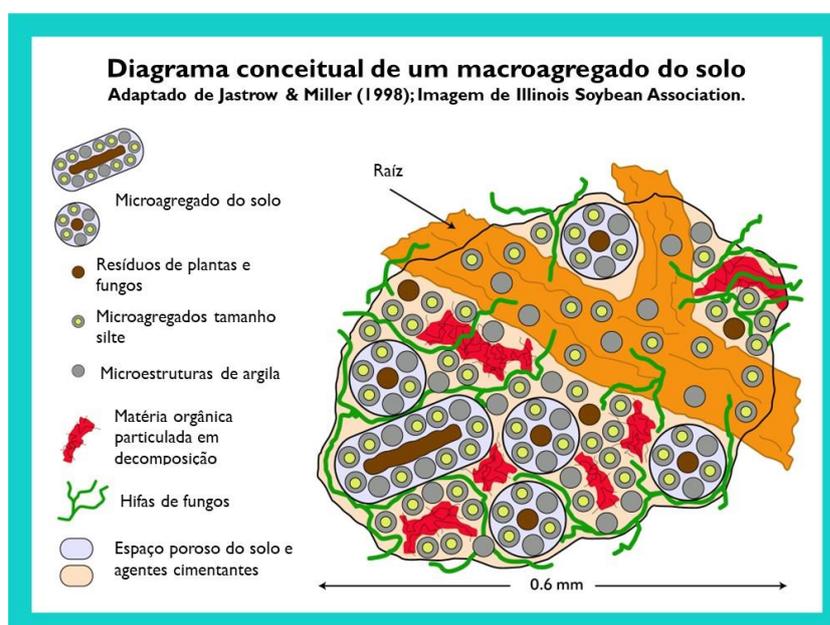


Figura 2. Diagrama conceitual de um macroagregado do solo. Adaptado de Jastrow & Miler (1998).

Macro e microagregados apresentam diminuição da concentração de oxigênio no seu interior, reduzindo a ação microbiana de decomposição de

compostos orgânicos e estabilizando o acúmulo de matéria orgânica no solo, que irá resultar em aumento dos teores de C e N do solo. Porém, a estabilização de carbono é dificultada em solos arenosos, devido à menor estabilização pela interação organomineral, como os que ocorrem na maior parte das terras baixas cultivadas com arroz irrigado (Nascimento et al., 2009).

A adoção do plantio direto beneficia diretamente os atributos químicos, físicos e biológicos do solo. O acúmulo de carbono proporcionado por práticas conservacionistas de manejo do solo, como o plantio direto, proporciona aumento da biomassa microbiana do solo (Carlos et al., 2022b), catalisa a estabilização da estrutura do solo (Veloso et al., 2019b) e aumenta a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo (Bayer & Mielniczuk, 1997). Conforme trabalho de Carlos et al. (2022), após 24 anos de adoção do plantio direto em sistemas de monocultivo de arroz irrigado com azevém de ressemeadura natural no inverno, em um Gleissolo no RS, há um aumento dos teores de carbono orgânico total, particulado e associado aos minerais na camada de solo de 0-2,5 cm em relação ao sistema convencional de preparo de solo. Da mesma forma, Denardin et al. (2020) encontraram resultados positivos em relação a adoção do plantio direto a atributos físicos e biológicos. O plantio direto, após 21 anos em sistema de monocultivo, apresentou diminuição (18%) na densidade do solo na camada de 0-5 cm. Neste mesmo trabalho, o plantio direto aumentou os teores de carbono (50%) e nitrogênio (42%) da biomassa microbiana em relação ao sistema convencional com preparo de solo.

Com relação à resposta em produtividade das culturas e à resposta de atributos do solo ao longo do tempo em sistemas de plantio direto, essas podem ser contextualizadas conforme proposta de Sá (2002). Essa contextualização é descrita conforme o tempo de adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo, agrupando o tempo em fases iniciais (0 a 5 anos), de transição (5 a 10 anos), de consolidação (10 a 20 anos) e de manutenção (mais de 20 anos). Nas fases iniciais e de transição há grande exigência de N pelas culturas e a imobilização de nitrogênio é maior que a mineralização de N. Nos 10 primeiros anos de plantio direto de arroz irrigado em monocultivo em terras baixas, Carlos et al. (2022) relataram que há menor produtividade do arroz irrigado devido à imobilização de N pela biomassa microbiana. E, após 19 anos de adoção do

plantio direto, há uma equiparação da produtividade do arroz irrigado em plantio direto e em preparo convencional do solo. Contudo, os mesmos autores relatam que o lucro bruto provindo do arroz irrigado em plantio direto é superior ao preparo do solo, principalmente devido à redução nos custos com preparo de solo.

2.3. Cultivo de leguminosas como planta de cobertura

Além do não revolvimento do solo e do plantio direto, a prática de uso de plantas de cobertura no período hibernal propicia maior entrada de material orgânico. O uso de plantas leguminosas em sistemas agrícolas e seus benefícios sobre a construção da fertilidade do solo são internacionalmente reconhecidos como pilar para a sustentabilidade de uso do solo (Meena and Lal, 2018).

Estudos mostram que leguminosas apresentam a capacidade de acumular 30% a mais de carbono em comparação a outras espécies (Johnson and Curtis, 2001). As principais implicações de plantas leguminosas no solo são: aporte de resíduo de maior teor de nitrogênio no solo devido a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e maior sequestro de carbono no solo, sendo que o maior sequestro de carbono por parte das leguminosas é uma consequência da qualidade do resíduo aportado. A qualidade do resíduo vegetal aumenta a eficiência dos microrganismos do solo no acúmulo de carbono no solo (Cotrufo et al., 2013). O aumento do teor de nitrogênio no tecido vegetal, seja pela adubação nitrogenada ou FBN, aumenta a labilidade dos resíduos vegetais. O uso conjunto de leguminosas e práticas conservacionistas de manejo do solo, como o plantio direto, favorecem a associação organomineral do carbono com partículas do solo (Velooso et al., 2019) .

Dentre as alternativas de plantas de cobertura para ambientes de terras baixas, o trevo-persa (*Trifolium resupinatum* L) é uma espécie forrageira de duplo propósito, pastejo e cobertura do solo, com adaptação a ambientes hidromórficos de terras baixas. A possibilidade de aporte de material orgânico no período hibernal aumenta os processos ordenativos no solo. Contudo, visto que o arroz

aporta resíduo de baixa qualidade em grande quantidade, o aporte de N proveniente da fixação biológica de nitrogênio (FBN) do trevo-persa estimula a ação microbiana sobre resíduos vegetais, podendo aumentar a ciclagem de nutrientes em um sistema de cultivo com arroz irrigado e trevo-persa no inverno. Esse aporte de N pela trevo-persa aumenta a disponibilidade de N no solo e na solução do solo (Garcia, 2020), aumentando a eficiência de uso do nitrogênio pelo arroz irrigado. O trabalho de Weinert et al. (2023), com uso de trevo-persa em sucessão ao arroz irrigado, demonstra que tanto a disponibilidade de N na solução do solo como o teor de N na biomassa microbiana do solo durante o cultivo do arroz irrigado apresentaram resposta positiva á adoção da leguminosa como planta de cobertura; enquanto, os maiores incrementos na resposta produtiva do arroz irrigado pela adoção do trevo-persa em plantio direto são encontrados entre as doses de 0 a 60 kg de N ha⁻¹.

Além da influência no ciclo do nitrogênio no solo, o uso de leguminosas contribuem para o aumento da CTC do solo devido ao acúmulo de carbono no solo (Bayer & Mielniczuk, 1997). Os solos de terras baixas no RS apresentam valores baixos de CTC devido a sua mineralogia e o aumento do teor de carbono no solo tem papel importante no aumento da CTC. Por sua vez, o desenvolvimento da CTC do solo possibilita aumento da eficiência de uso de potássio pelo arroz irrigado (Anghinoni et al., 2013). Nesse sentido, a introdução de leguminosas como ferramenta na recuperação de solos degradados em terras baixas possibilita um sinergismo direto e indireto entre atributos químicos, físicos e biológicos e a resposta dos cultivos perante a adoção do plantio direto em terras baixas em sistemas de monocultivo de arroz irrigado.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização geográfica, clima, solo e histórico da área

O experimento foi implantado em março de 2018 e o período de avaliações do presente estudo foi compreendido entre março de 2018 até abril de 2022. A área experimental utilizada estava localizada no município de Capivari do Sul, RS, Brasil. A região ecofisiológica é denominada de Planície Costeira Externa, tradicional região caracterizada pelo cultivo de arroz irrigado no RS. De acordo com Alvares et al. (2013), o clima da região é classificado como Cfa, clima subtropical com verões quentes. A temperatura e a pluviosidade média anual (**Figura 3**) são de 19,7 °C e 1.471 mm, respectivamente.

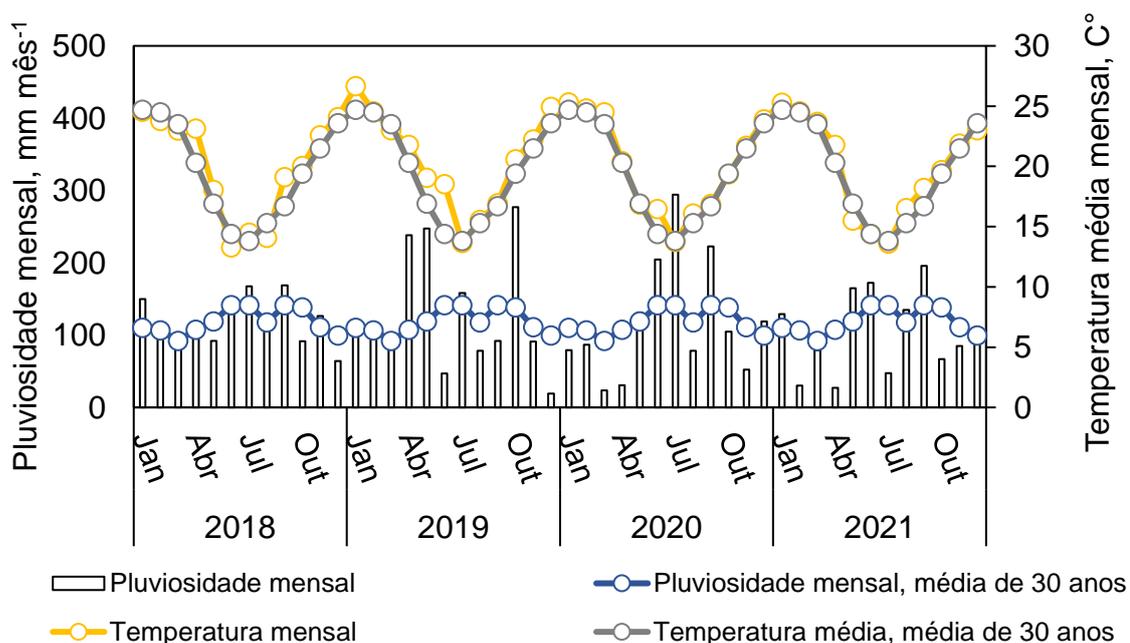


Figura 3. Pluviosidade média mensal e temperatura média mensal e pluviosidade e temperatura média mensal de 30 anos (INMET, 2021). Capivari do Sul/RS-Brasil.

Anteriormente à implantação do experimento, aproximadamente de 2000 até 2014, a área experimental era cultivada com a cultura do arroz irrigado em preparo convencional, passando para o cultivo de soja com preparo de solo

de 2015 até março de 2017. A área apresentava declive menor que 1% e previamente ao experimento a área foi nivelada (realizado preparo de solo com grade leve), sistematizada e construídos os canais e os drenos para irrigação e drenagem.

O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háplico, típico de áreas de terras baixas com cultivo de arroz irrigado (Streck et al., 2018). A textura do solo da área experimental é arenosa (821 g kg⁻¹ de areia), sendo enquadrado como Areia Franca na classificação textura (Santos et al., 2018). A concentração de argila apresenta distribuição homogênea no perfil de solo de 0-30 cm (**Tabela 1**).

Tabela 1. Teores de areia, silte e argila do Planossolo Háplico da área experimental. Capivari do Sul/RS-Brasil.

Camada de solo	Areia ¹	Silte ¹	Argila ¹
----- cm -----	----- g kg ⁻¹ -----		
0-5	817	90	93
5-10	811	101	88
10-20	830	88	82
20-30	827	90	84

¹Método da pipeta (Teixeira et al., 2017).

A caracterização química do solo antes da implantação do experimento está apresentada na **Tabela 2**. Os teores de fósforo (P) e de potássio (K) disponíveis no solo e de cálcio (Ca) e de magnésio (Mg) trocáveis no solo estavam na classe Baixa, Média, Média e Alta de disponibilidade, respectivamente, para culturas classificadas como exigentes. Porém, o teor de P disponível no solo para a cultura do arroz irrigado estava classificado na classe de disponibilidade Muito Alto na implantação do experimento. Esta classificação de disponibilidade foi realizada conforme CQFS-RS/SC (2016) e SOSBAI (2018)

Tabela 2. Atributos químicos do solo em pré-implantação da área experimental, março de 2018. Capivari do Sul/RS-Brasil.

Camada	pH-H ₂ O ¹	Al ³⁺ ²	H+Al ²	CTC pH7 ⁵	Ca ²	Mg ²	P ⁶	K ⁶	Na ⁶	V ⁷	m ⁷
-- cm --		----- cmol _c dm ⁻³ -----					--- mg dm ⁻³ ---				-- % --
0-5	4,3	1,3	10,3	13,6	2,3	1,4	14	87	34	27	28
5-10	4,2	1,3	11,1	13,2	2,1	1,3	15	79	30	27	26
10-20	4,2	1,3	11,9	14,8	2,1	1,2	16	80	34	26	27

¹Relação 1:1; ² Alumínio, cálcio e magnésio trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹); ³Calculado a partir do Índice SMP conforme Tedesco et al. (1995) Tedesco et al. (1995); ⁴CTC efetiva = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Al³⁺; ⁵CTC pH7,0 = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + (H+Al); ⁶Fósforo, potássio e sódio disponíveis no solo (Mehlich-1); ⁷Saturação por Ca, Mg, K e Al na CTC pH 7,0 = [(Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Al³⁺)/CTCpH7,0]*100; ⁸Saturação por alumínio = (Al³⁺/CTC efetiva) *100.

3.2. Tratamentos e delineamento experimental

O croqui da área experimental está ilustrado no **Apêndice A**. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com três repetições. A área experimental total apresentava aproximadamente 3 ha, e as parcelas experimentais aproximadamente 0,35 ha. Os tratamentos utilizados neste trabalho fazem parte de um protocolo experimental com sete sistemas de produção de arroz irrigado em terras baixas, sendo três deles em monocultivo de arroz irrigado e quatro em integração lavoura-pecuária. Contudo, neste estudo são abordados os tratamentos em monocultivo.

Os tratamentos consistiam em três sistemas de produção de arroz irrigado em terras baixas. Estes tratamentos foram idealizados para avaliar a introdução de práticas conservacionistas de manejo do solo (plantio direto e cobertura hiberna do solo), em áreas de terras baixas com monocultivo anual de arroz irrigado, os quais foram conduzidos por quatro anos e, portanto, 4 ciclos de inverno (2018, 2019, 2020 e 2021) e 4 ciclos de verão (safras 2018/19, 2019/20, 2020/21 e 2021/22). Abaixo estão descritos detalhadamente os tratamentos e a **Tabela 3** apresenta a cronosequência dos tratamentos. No caso das práticas conservacionistas em terras baixas, é considerado como prática básica o não revolvimento do solo, caracterizando o plantio direto. No mesmo sentido, o sistema plantio direto neste trabalho será caracterizado pelo não revolvimento do solo e uso de planta de cobertura no período hiberna, porém, em sistema de monocultivo de arroz irrigado.

Tratamento PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo de solo com pousio (plantas espontâneas) no inverno. Este é o sistema de cultivo de maior abrangência em áreas tradicionais de produção de arroz irrigado (DATER-IRGA, 2021).

Tratamento PD: Monocultivo de arroz irrigado semeado em plantio direto, sem preparado de solo (com exceção da safra 2018/2019, onde ocorreu preparo do solo para implantação do experimento), com pousio no inverno.

Tratamento PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado semeado em plantio direto, sem preparo de solo desde o inverno de 2018, com trevo-persa (*Trifolium resupinatum* L.) como planta de cobertura no inverno.

Tabela 3. Cronossequência de cultivo por ano e época dos tratamentos com as variáveis de manejo do solo utilizadas no experimento. Capivari do Sul/RS-Brasil.

Ano/Período		Tratamentos		
		PC	PD	PD+Leg
		Manejo do solo		
		Preparo de solo de verão	Plantio direto	Plantio direto + leguminosa
2018	Inv.	Po	Po	TP
2018/19	Verão	Ar	Ar	Ar
2019	Inv.	Po	Po	TP
2019/20	Verão	Ar	Ar	Ar
2020	Inv.	Po	Po	TP
2020/21	Verão	Ar	Ar	Ar
2021	Inv.	Po	Po	TP
2021/22	Verão	Ar	Ar	Ar

PC: preparo convencional; PD: plantio direto; PD+Leg: plantio direto com leguminosa como planta de cobertura; Po: Pousio; Ar: Arroz irrigado; TP: Trevo persa.

3.3. Condução da lavoura de arroz irrigado

A condução da lavoura de arroz irrigado (uso de inseticidas, fungicidas, herbicidas etc.) foi realizada sempre seguindo as recomendações técnicas regionais da pesquisa para o arroz irrigado (SOSBAI, 2018) . A **Tabela 4** apresenta as cultivares, a densidade de semeadura e a data de semeadura e colheita dos tratamentos. A escolha das cultivares foi efetuada por

representatividade de uso por produtores orizícolas e por disponibilidade na região. A semeadura ocorreu entre os meses de outubro e novembro, sendo esta realizada em linha com semeadora de fluxo contínuo equipada de discos duplos. A dessecação em pré-semeadura foi realizada com utilização de herbicida não seletivo, em média 15 dias antes da semeadura do arroz irrigado.

Tabela 4. Cultivares de arroz irrigado, densidade de semeadura, data de semeadura e data de colheita nos diferentes tratamentos e anos de avaliação do experimento. Capivari do Sul/RS-Brasil.

Safra	Cultivar	Densidade de semeadura	Data de semeadura	Data de colheita
2018/19	BRS Pampeira	100 kg ha ⁻¹	23/10/2018	08/03/2019
2019/20	IRGA 424 RI	80 kg ha ⁻¹	20/11/2019	29/03/2020
2020/21	XP 113 FP	55 kg ha ⁻¹	29/10/2020	04/03/2021
2021/22	BRS Pampa CL	80 kg ha ⁻¹	26/10/2021	10/03/2022

No tratamento PC o preparo de solo ocorreu entre os meses de setembro/outubro de cada ano. Este consistiu em três passadas de grade leve e uma passada de plaina para nivelamento do terreno e após houve a construção das taipas para irrigação. No PD e PD+Leg, como não houve preparo de solo, somente foi empregado o uso de maquinário agrícola para semeadura, tratamentos fitossanitários e manutenção das taipas para irrigação do arroz irrigado. Previamente à colheita do arroz irrigado cessou-se a irrigação para que houvesse a colheita quando o solo estivesse menos friável, fazendo com que menos solo fosse desnivelado durante a colheita. Porém, caso houvesse desnivelamento do terreno pela colheitadeira autopropelida, corrigia-se o nível do terreno com plaina nos locais afetados após a colheita.

A adubação da lavoura empregada no experimento foi calculada conforme SOSBAI (2018) para alta expectativa de resposta à adubação. Na adubação

nitrogenada a dose de nitrogênio (N) utilizada foi de 150 kg de N ha⁻¹, utilizando ureia comum (45% N) como fonte. A dose de N foi parcelada no arroz irrigado e aplicada a lanço, onde 2/3 da dose ocorreu no estágio fenológico V₃/V₄, estabelecimento do estande de plantas e início do perfilhamento, e 1/3 em R₀, na diferenciação da panícula. A adubação de P e K foi de 90 e 120 kg ha⁻¹, respectivamente, havendo como fontes superfosfato triplo (SFT) e cloreto de potássio (KCl). A adubação de P ocorreu na linha de semeadura e a de K a lanço após a semeadura do arroz.

3.4. Amostragem do arroz irrigado para produtividade

A amostragem do arroz irrigado para estimativa de produtividade ocorreu no estágio fenológico R₈/R₉. Nesta amostragem, se coletou seis metros lineares com espaçamento entrelinhas de 0,17 cm, divididos em três locais por parcela experimental. As amostras de biomassa vegetal da parte aérea de arroz irrigado foram trilhadas e as amostras de grãos foram corrigidas para 13% de umidade para a estimativa de produtividade em kg ha⁻¹.

3.5. Condução do período hibernar

Diferentemente do PC e PD, no PD+Leg houve a introdução do trevo-persa como planta de cobertura hibernar. A cultivar de trevo persa utilizada foi a "Lightning". A densidade de semeadura do trevo persa variou durante os anos, sendo utilizados 8, 6, 5 e 6 kg ha⁻¹ de sementes puras e viáveis nos invernos de 2018, 2019, 2020 e 2021, respectivamente. A semeadura do trevo persa foi realizada a lanço, entre abril e maio de cada ano. Nos outros tratamentos não houve semeadura de plantas de cobertura, sendo a vegetação do período hibernar no PC e PD composta por plantas espontâneas e daninhas, principalmente gramíneas.

3.6. Estimativa da produção de resíduos vegetais pelo arroz irrigado e pelas plantas do período hibernar

A estimativa de produção de resíduos do arroz irrigado foi calculada com base na produtividade da cultura. Para as cultivares provenientes de cruzamento de linhagens: BRS Pampeira, IRGA 424 RI e BRS Pampa CL e para o híbrido XP 113 FP se utilizou um coeficiente de 0,50 como índice de colheita para estimar a produção de resíduo da parte aérea do arroz irrigado. Na estimativa de produção de resíduos por raízes do arroz irrigado se utilizou uma relação de 0,15 da parte aérea/raiz (Chu et al., 2018).

A amostragem da produção de biomassa vegetal do período hibernar da parte aérea ocorreu em pré-semeadura do arroz irrigado. A biomassa vegetal da parte aérea foi coletada em uma área de 0,25 m² em três locais de cada parcela experimental. A biomassa vegetal foi cortada rente ao solo, acondicionada em sacos de papelão, secas a 65°C em estufa de ar forçado até peso constante e pesadas para estimativa de produção de matéria seca por hectare. A estimativa de resíduo de raízes pela biomassa vegetal do período hibernar foi feita com base da relação parte aérea/raízes de 0,33 conforme Redin et al. (2018).

3.7. Coleta de atributos biológicos, físicos e químicos do solo

A coleta de solo ocorreu no final de outubro de 2021, após 42 meses do início do experimento, no final do ciclo de inverno e em pré-semeadura do arroz irrigado nos tratamentos. Atributos químicos, físicos e biológicos do solo foram avaliados, sendo que os atributos químicos e físicos foram avaliados em quatro camadas: 0 a 5, 5 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm; enquanto os atributos biológicos foram avaliados na camada de 0 a 10 cm. Após a amostragem, as amostras de solo foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Pesquisa em Fertilidade do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As amostras de atributos biológicos foram coletadas e armazenadas em caixas térmicas resfriadas durante a coleta e durante o deslocamento.

Nas amostras de solo destinadas à avaliação dos atributos químicos, foi utilizado trado calador e se coletou dez subamostras por parcela experimental. Os atributos químicos do solo avaliados, segundo Tedesco et al. (1995), foram: pH-H₂O (relação 1:1), índice SMP (estimativa da acidez potencial, H+Al), CTC pH 7,0, CTC efetiva, teores de P, K e Na disponíveis no solo (Mehlich-1), teores de Ca, Mg, Al trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹) no solo, saturação por Ca, Mg, K, Na e saturação por alumínio (m%).

Os atributos físicos do solo avaliados foram densidade do solo, densidade de partícula (para cálculo da porosidade total), resistência à penetração, porosidade total, diâmetro médio ponderado dos agregados via seca e via úmida, porcentagem de macro e microagregados via seca e via úmida, índice de estabilidade de agregados e umidade gravimétrica e volumétrica do solo no momento de coleta. As amostras de solo destinadas à avaliação da densidade do solo e das variáveis relacionadas à agregação do solo foram coletadas a partir da abertura de trincheiras de 0,4 m de profundidade, com três subamostras por parcela experimental. A densidade do solo foi avaliada com a utilização de anéis volumétricos de 4,9 cm de altura por 5,7 cm de diâmetro (aproximadamente 127 cm³).

A partir das amostras de agregados se realizou metodologia conforme (Kemper and Chepil, 1965) e adaptação de acordo com Mielniczuk & Silva (1997) para obtenção das variáveis de diâmetro médio ponderado seco (DMPs), diâmetro ponderado úmido (DMPu) e índice de estabilidade dos agregados (IEA). Na metodologia para avaliação do estado de agregação do solo se utilizou seis peneiras: 4,75, 2,00, 1,00, 0,500, 0,250 e 0,053 mm. Os macroagregados foram classificados como sendo os que ficam acima da peneira de 0,250 mm, e os microagregados como os que passam pela peneira de 0,250mm. A metodologia empregada na avaliação da densidade do solo, densidade de partícula, porosidade total, umidade do solo e das variáveis analisadas a partir das amostras de agregados estão descritas em Teixeira et al. (2017).

A resistência à penetração foi avaliada através de penetrômetro desenvolvido pela Falker Automação Agrícola, modelo PLG2040. As medidas em profundidade foram realizadas de 10 em 10 mm, com cone tipo 2, na

velocidade de 20 mm s¹, com 20 subamostras por parcela experimental. Os dados de resistência à penetração medidos de 10 em 10 mm foram agrupados nas camadas de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm através da sua média para manter o padrão de análise dos dados deste trabalho.

Nos atributos biológicos do solo, se avaliou: carbono (C-BMS) e nitrogênio (N-BMS) da biomassa microbiana, relação C:N da biomassa (C:N-BMS), respiração basal diária (C-CO₂) e quociente metabólico (q-CO₂). As amostras biológicas foram armazenadas a 4°C após a coleta e no transporte, analisadas logo em sequência. No laboratório as metodologias dos dados biológicos foram realizadas em triplicada. Antes de serem analisadas as amostras foram peneiradas (peneira de 2,00 mm), e a sua análise ocorreu conforme metodologia disponível em Mendonça & Matos (2005). Os teores de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), nitrogênio total (NT) e nitrogênio da matéria orgânica particulada (NMOP) foram analisados através de combustão seca, em analisador elementar modelo Flash EA1112 (Thermo Electron Corporation, Milan, Italy), através da metodologia descrita por Cambardella e Elliott (1992), com modificações conforme trabalho de Conceição et al. (2014).

3.8. Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram submetidos às pressuposições da análise de variância (ANOVA). Normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$), homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett ($p > 0,05$) e análise residual de forma visual residual. Quando necessário, o banco de dados foi transformado elevando a variável à potência de Lambda. O valor Lambda apropriado foi obtido através da realização de uma análise de transformação Box-Cox. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, versão 4.1.2), através da interface do R Studio, usando o pacote AgroR. Quando os efeitos dos fatores de variação foram significativos na ANOVA ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Os seguintes modelos estatísticos foram utilizados na ANOVA:

a) Atributos químicos e físicos do solo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + P_j + \text{Erro a (ij)} + T_k + P_j T_k + \text{Erro b(ijk)}$$

Onde: μ = média geral do experimento; B = bloco (i = 1, 2, 3); P = camada de solo (j = 1, 2, 3, 4); T = tratamentos (k = 1, 2, 3) e Erro = erro experimental.

b) Atributos biológicos do solo, produtividade do arroz irrigado e matéria seca do período hibernar:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + T_j + \text{Erro (ij)}$$

Onde: μ = média geral do experimento; B = bloco (i = 1, 2, 3); T = tratamentos (j = 1, 2, 3) e Erro = erro experimental.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Produtividade do arroz irrigado e de plantas hibernais

A produtividade do arroz irrigado das safras 2018/19 até 2021/22 está apresentada na **Figura 4**. Não houve diferenças estatísticas na produtividade do arroz irrigado entre anos e entre tratamentos. A produtividade média do experimento para a última safra (2021/22) foi de 8.380 kg ha⁻¹. Comparativamente com os dados da safra para a região da Planície Costeira Externa, levantados por DATER & NATE's (2022), estima-se que a região apresentou produtividade média do arroz irrigado de 7.728 kg ha⁻¹.

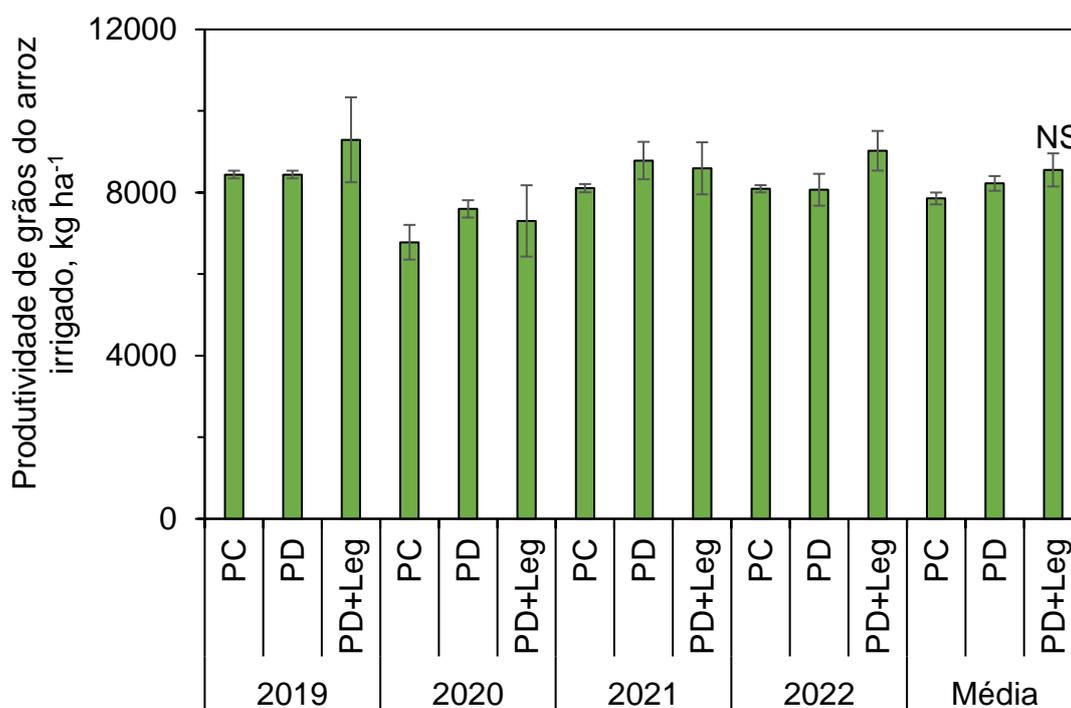


Figura 4. Produtividade de grãos do arroz irrigado de 2019 até 2022 e média dos 4 anos em diferentes sistemas de produção em monocultivo em um Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras indicam o erro padrão da média. Teste de Tukey ($p < 0,05$). “NS” – não significativo. PC – Pousio no inverno e preparo de solo no verão; PD – Pousio no inverno e plantio direto do arroz irrigado. PD+Leg – Trevo-persa como planta de cobertura no inverno e plantio direto do arroz irrigado.

A ausência de resposta na produtividade do arroz irrigado em curto prazo pela adoção do plantio direto é um resultado semelhante ao encontrado por

Carlos et al. (2022). Neste trabalho de longo prazo (24 anos), os autores demonstraram que a produtividade do arroz irrigado em anos iniciais do plantio direto foi inferior ao tratamento com preparo convencional, sendo que essa diferença deixou de ocorrer e passar a aumentar após 8 anos de implantação. A ausência de resposta do tratamento com trevo-persa também pode ser devido à alta dose de N aplicada no experimento ($150 \text{ kg de N ha}^{-1}$). Em trabalho de curto prazo avaliando a introdução do plantio direto e de leguminosa como planta de cobertura no inverno, Weinert et al. (2023) ao avaliarem a resposta do solo ao trevo-persa, encontraram maior teor de N na solução do solo. Grande parte desse maior teor se deveu à quantidade de N no resíduo das plantas de trevo-persa, o qual foi de $122,5 \text{ kg de N ha}^{-1}$ para a parte aérea e raízes, na média de quatro safras. Tal valor representa uma grande proporção (82%) de N em relação à dose de $150 \text{ kg de N ha}^{-1}$ utilizada neste trabalho. No entanto, os mesmos autores relatam que apesar da grande quantidade de N na planta de trevo-persa, a dose de máxima eficiência técnica de nitrogênio no arroz irrigado em sucessão a leguminosa seria reduzida de 181 para 155 kg ha^{-1} (14% a menos) quando se adotasse o trevo-persa como planta de cobertura. Apesar do aporte de $122,5 \text{ kg de N ha}^{-1}$ pelo trevo-persa, apenas $26 \text{ kg de N ha}^{-1}$ são reduzidos na dose de máxima eficiência técnica. Mas em relação aos maiores incrementos em produtividade do arroz irrigado estes foram obtidos no plantio direto com trevo-persa nas doses de 0 e $60 \text{ kg de N ha}^{-1}$, com 11,4 e 9,8% a mais do que o tratamento sem trevo-persa, respectivamente. Nas doses de 120 e $180 \text{ kg de N ha}^{-1}$ o incremento na produtividade do arroz irrigado pela adoção do trevo-persa como planta de cobertura foi de 5,6 e 4,3%, respectivamente.

Ou seja, o incremento na resposta do arroz irrigado a adoção do trevo-persa como planta de cobertura em plantio direto diminui conforme a dose de nitrogênio utilizada, podendo explicar a ausência de diferença na produtividade do arroz irrigado obtida neste trabalho. Porém, cabe ressaltar que a resposta do arroz irrigado pode ser influenciada pelo manejo de dessecação da planta de cobertura. Cerca de 65% do total de N absorvido pelo arroz ocorre em até 60 dias após a sua emergência, de um total de 130 dias. Esta fase de absorção de N está compreendida entre o estágio fenológico V3-V4 até o perfilhamento. Diante do resíduo de trevo-persa, que apresenta uma relação C:N de 18:1 (alta

degradabilidade pela microbiota do solo), cabe ressaltar que possivelmente a chave para o avanço do plantio direto utilizando uma leguminosa hibernal em áreas de monocultivo de arroz irrigado seja a compreensão da dinâmica entre a liberação de N pelo trevo-persa e a conciliação da absorção de N pela planta de arroz com a suplementação mineral de N via adubação. Deste modo, a compreensão das possíveis perdas de N nestes sistemas de produção é de vital importância para a sua sustentabilidade.

Em relação à produção de resíduos da parte aérea e das raízes do arroz irrigado (**Tabela 5**). Na média dos anos, foi estimado que a produtividade de resíduos da parte aérea e das raízes da cultura do arroz irrigado foi de aproximadamente 9.443 kg de matéria seca (MS) ha⁻¹ ao ano.

Tabela 5. Produção de resíduos da parte aérea, raízes e soma da parte aérea e raízes do arroz irrigado da safra 2018/19 até 2021/22 e média de quatro anos nos tratamentos avaliados em um planossolo háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil.

Tratamento	Safra				Média (4 safras)
	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	
	kg MS ha ⁻¹				
	Parte aérea do arroz irrigado				
PC	8442 (95)	6782 (426)	8107 (101)	8093 (89)	7856 (145)
PD	8442 (95)	7599 (213)	8785 (459)	8069 (391)	8224 (181)
PD+Leg	9294 (1041)	7304 (875)	8594 (638)	9024 (487)	8554 (407)
Média	8726 (410)	7229 (362)	8495 (334)	8395 (227)	8211 (119)
	Parte de raízes do arroz irrigado				
PC	1266 (14)	1017 (64)	1216 (15)	1214 (13)	1178 (22)
PD	1266 (14)	1140 (32)	1318 (69)	1210 (59)	1234 (27)
PD+Leg	1394 (156)	1096 (131)	1289 (96)	1354 (73)	1283 (61)
Média	1309 (62)	1084 (54)	1274 (50)	1259 (34)	1232 (18)
	Parte aérea + raízes do arroz irrigado				
PC	9708 (109)	7799 (490)	9324 (117)	9307 (102)	9034 (167)
PD	9708 (109)	8739 (245)	10102 (528)	9279 (450)	9457 (208)
PD+Leg	10688 (1198)	8400 (1006)	9883 (734)	10378 (560)	9837 (468)
Média	10035 (472)	8313 (417)	9769 (385)	9654 (261)	9443 (137)

PC – Pousio no inverno e preparo de solo no verão; PD – Pousio no inverno e plantio direto do arroz irrigado. PD+Leg – Trevo-persa como planta de cobertura no inverno e plantio direto do arroz irrigado. O erro padrão das variáveis está entre parênteses.

Em relação à produtividade de resíduo no inverno, o PD+Leg apresentou, na média de 2 anos (2018 e 2019), maior matéria seca em relação aos

tratamentos com preparo de solo (PC) e plantio direto (PD) (**Figura 6**). Somente com relação à parte aérea do trevo persa, houve uma produtividade média de matéria seca de 3.969 kg ha⁻¹, enquanto nos tratamentos PD e PC esta produção foi de 1.085 kg MS ha⁻¹ e 26 kg MS ha⁻¹, respectivamente.

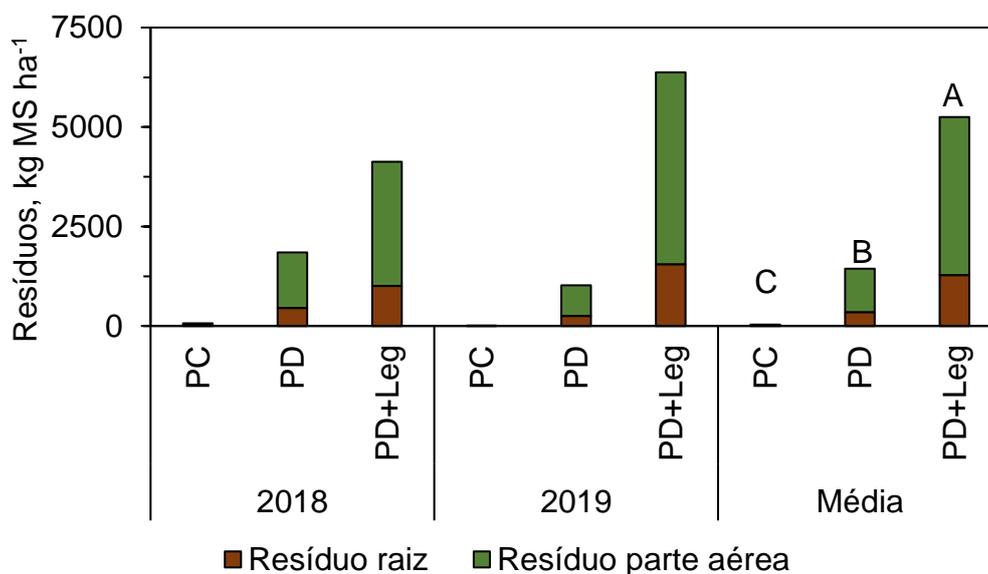


Figura 5. Produção de resíduos, em matéria seca (MS), do resíduo da parte aérea e das raízes no período hibernal por diferentes tratamentos nos invernos de 2018 e 2019 em um Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras indicam o erro padrão da média. Teste de Tukey ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferenciam os tratamentos. PC – Pousio no inverno e preparo de solo no verão; PD – Pousio no inverno e plantio direto do arroz irrigado. PD+Leg – Trevo-persa como planta de cobertura no inverno e plantio direto do arroz irrigado.

A produtividade de resíduos provenientes da cultura do arroz irrigado somada à produtividade do período hibernal promoveu maior adição de resíduos vegetais nos tratamentos PD (10.660 kg MS ha⁻¹) e PD+Leg (14.794 kg MS ha⁻¹), em relação ao tratamento PC (8.788 kg C ha⁻¹) (**Figura 7**). Uma das preocupações da adoção de práticas conservacionistas em terras baixas está relacionada à adição de resíduos em pré-semeadura do arroz irrigado e à produção de ácidos orgânicos com potencial toxidez ao arroz irrigado (Bohnen et al., 2005; Bortolon et al., 2009), que pode acarretar em diminuição da produtividade de grãos. Diante do superior aporte de resíduos no tratamento PD+Leg, a presença de uma planta de cobertura pode elevar as taxas de

evapotranspiração no período hibernal, tornando o ambiente mais aeróbico para a metabolização de compostos orgânicos (ácido acético, por exemplo) por microorganismos do solo. Além disso, pode ocorrer maior aeração do solo devido a própria estruturação do mesmo, devido a maior presença de raízes.

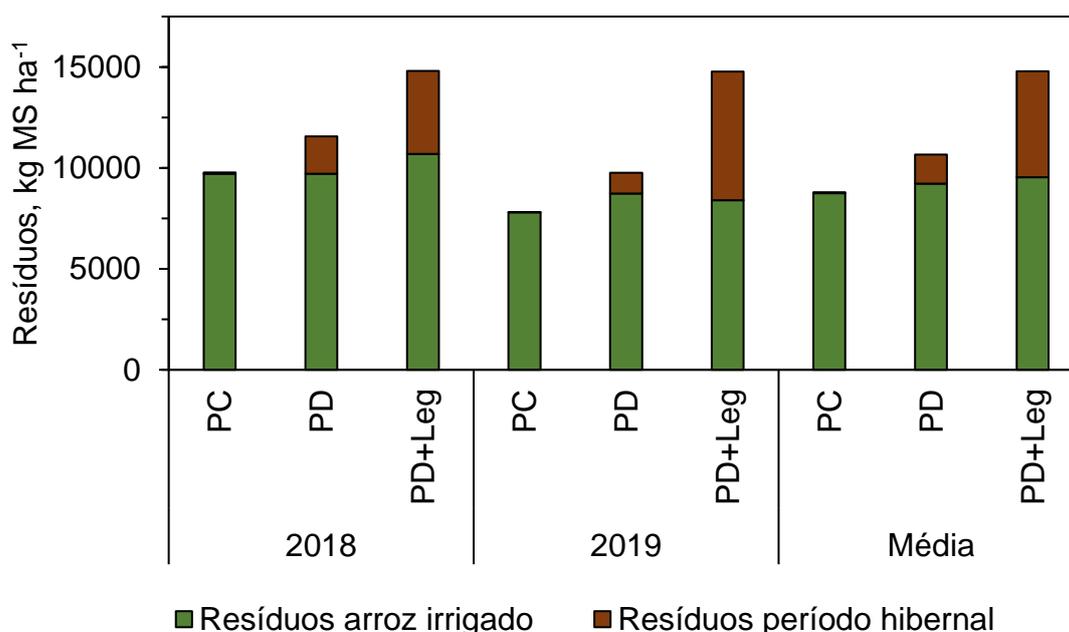


Figura 6. Produção de resíduos em matéria seca (MS) do arroz irrigado e do período hibernal em diferentes tratamentos em monocultivo de arroz irrigado em um Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. PC – Pousio no inverno e preparo de solo no verão; PD – Pousio no inverno e plantio direto do arroz irrigado. PD+Leg – Trevo-persa como planta de cobertura no inverno e plantio direto do arroz irrigado.

Em um experimento em condições semelhantes a este trabalho, Denardin et al. (2019) avaliaram a adoção do plantio direto em terras baixas em sistemas de monocultivo de arroz irrigado no RS. A produtividade do arroz irrigado em plantio direto somente superou o sistema convencional (com preparo de solo) 14 anos após sua adoção. Tais resultados podem estar atrelados a imobilização de N devido ao alto aporte de material de baixa relação C/N e lignificado do arroz irrigado (Carmona et al., 2018), além da adubação mineral nitrogenada ser a única entrada de N no sistema. Porém, outro ponto importante é em relação ao ambiente anaeróbico durante o cultivo do arroz irrigado. A passagem de um ambiente parcialmente aeróbico para um anaeróbico durante o cultivo do arroz irrigado altera a constituição da população de microorganismos do solo. Além

disso, no ambiente anaeróbico o processo metabólico é reduzido devido à baixa concentração de oxigênio. Estas características dos sistemas de monocultivo de arroz irrigado, juntamente com a retenção de resíduos de alta relação C:N e alto teor de lignina na superfície do solo, podem favorecer a imobilização de nutrientes por microorganismos e a não disponibilidade para a cultura, como o N. Entretanto, neste trabalho de curto prazo não houve diferença na produtividade do arroz irrigado (Figura 4), da safra 2018/19 até a safra 2021/22, apesar do superior aporte médio de resíduos no PD+Leg (Figura 7), demonstrando que há ganhos em curto prazo pela a manutenção da produtividade.

4.2. Atributos biológicos do solo

Analisando os atributos de respiração basal diária (C-CO₂) e carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS) (**Figura 8A e Figura 8B**), valores superiores foram encontrados no sistema de plantio direto com cobertura de trevo persa (PD+Leg). No trabalho de Silva et al. (2022), onde os autores avaliaram a adição de resíduos provenientes de leguminosas, gramíneas e uma combinação leguminosa+gramínea sobre atributos biológicos do solo, evidenciou que a biomassa vegetal proveniente de leguminosas é mais suscetível à degradação microbiana, fazendo com que a sua adição estimule a mineralização do resíduo da biomassa vegetal e conseqüentemente emita mais C-CO₂. Outro ponto importante em relação a C-CO₂, além da relação C:N do resíduo vegetal, é a quantidade no aporte de resíduos entre os tratamentos (**Figura 7**), os quais servem de fonte de recurso para a emissão de CO₂. Em fases iniciais de plantio direto ocorre maior imobilização de C na biomassa microbiana, possivelmente pela melhoria do ambiente para o desenvolvimento de microorganismos do solo (Sá et al., 2001).

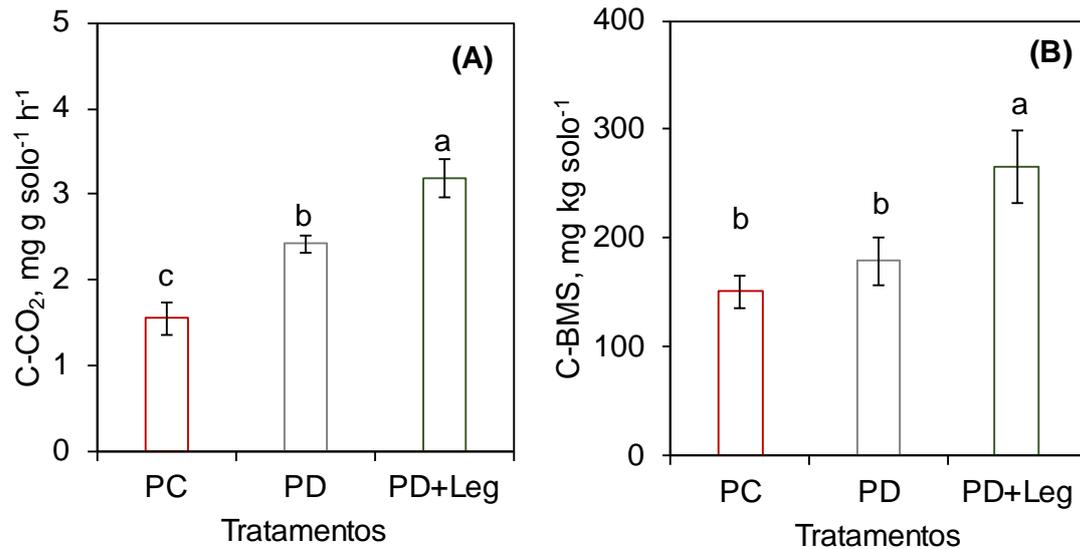


Figura 7. Respiração basal (C-CO₂) (A) e carbono da biomassa microbiana (C-BMS) (B) de Planossolo Háplico após 3,5 anos de adoção de diferentes sistemas de produção de arroz irrigado. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras indicam o erro padrão da média. Teste de Tukey (p<0,05). PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo do solo; PC – Pousio no inverno e preparo de solo no verão; PD – Pousio no inverno e plantio direto do arroz irrigado. PD+Leg – Trevo-persa como planta de cobertura no inverno e plantio direto do arroz irrigado.

O aumento nos valores de C-CO₂ e C-BMS pode estar relacionado ao maior aporte de C no tratamento de plantio direto com trevo-persa. Contudo, a qualidade do resíduo da biomassa vegetal é um fator importante para esta resposta dos atributos biológicos. A maior C-CO₂, juntamente do C-BMS, é um sinalizador de produção de compostos orgânicos lábeis, a qual pode favorecer a ciclagem de nutrientes e a estabilização do C. Entretanto, não foram observadas diferenças na relação C:N, no teor de N (N-BMS) e no quociente metabólico da biomassa microbiana do solo (qCO₂), os quais apresentaram médias de 10,4 mg C mg N⁻¹ g solo⁻¹, 20,3 mg N g solo⁻¹ e 322,8 mg C g solo⁻¹ h⁻¹, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6. Teores de nitrogênio (N-BMS), relação carbono e nitrogênio (Relação C:N-BMS) e quociente metabólico (qCO₂) da biomassa microbiana do solo em um Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil.

Tratamento	N-BMS (mg N g solo ⁻¹)	Relação C:N-BMS (mg C mg N ⁻¹ g solo ⁻¹)	qCo2 (mg C g solo ⁻¹ h ⁻¹)
PC	18,0 (3,9)	9,1 (0,8)	271,8 (74,1)
PD	20,4 (3,8)	9,6 (1,5)	366,9 (58,5)
PD+Leg	22,5 (3,6) ns	12,6 (2,4) ns	329,6 (68,1) ns

O erro padrão das variáveis está entre parênteses. Teste de Tukey (p<0,05). ns – não significativo. PC: Monocultivo de arroz irrigado lavração e gradagem; PD: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto; PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto com trevo-persa como planta de cobertura.

Os teores de carbono orgânico total, nitrogênio total, carbono associado aos minerais do solo, carbono orgânico particulado do solo (**Figura 10**) tiveram ausência de resposta em relação aos tratamentos. O nitrogênio da matéria orgânica particulada do solo (**Figura 10D**) apresentou diferença entre tratamentos nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm. Na camada de 0 a 5 cm o tratamento PD+Leg foi superior aos tratamentos PC e PD para o nitrogênio da matéria orgânica particulada do solo. Na camada de 5 a 10 cm o nitrogênio da matéria orgânica particulada do solo foi superior para PD+Leg em relação ao PD, porém o PC não se diferiu em relação ao PD e PD+Leg. Entre camadas, o carbono orgânico total, nitrogênio total e carbono orgânico particulado do solo apresentaram valores superiores na camada de 0 a 5 cm, com valores inferiores e decrescendo até a camada de 20-30 cm.

A resposta do nitrogênio da matéria orgânica particulada do solo ao PD+Leg em curto prazo (3,5 anos) de adoção do manejo conservacionista de solo em terras baixas sugere um aumento nos processos ordenativos, de reorganização do solo. Em médio e longo prazo é esperado que a continuidade do uso do trevo-persa como planta de cobertura possa refletir também sobre a disponibilidade de N no solo e a resposta do arroz irrigado; além de aumento do conteúdo de carbono no solo e nas suas frações mais lábeis (carbono orgânico particulado do solo), os quais são essenciais para a ciclagem e disponibilidade de N, P e S e retenção de cátions em solos arenosos.

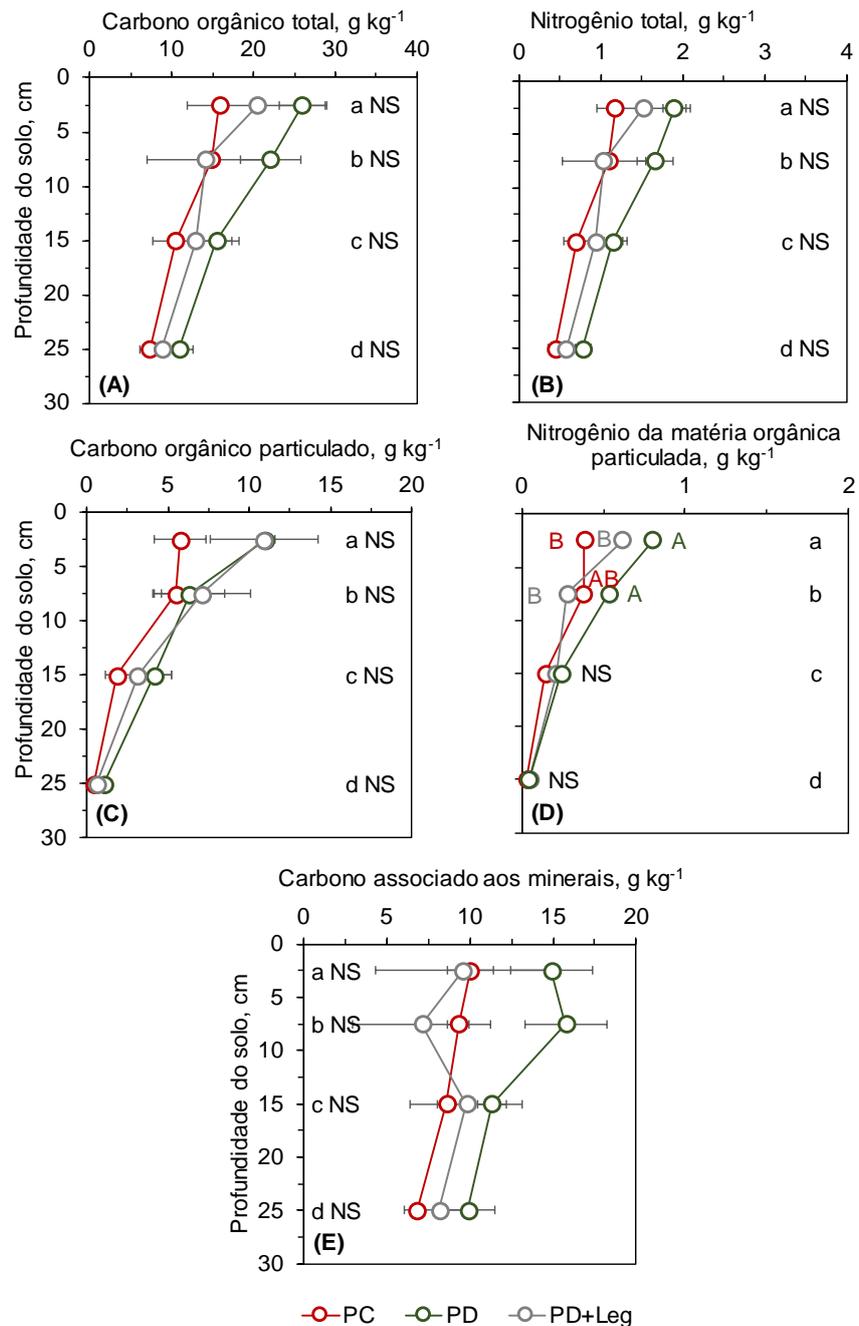


Figura 8. Carbono orgânico total (A), nitrogênio total (B), carbono orgânico particulado (C), nitrogênio da matéria orgânica particulada (D) e carbono orgânico associado aos minerais do solo (E) em diferentes tratamentos e camadas de solo em um planossolo háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. Letras maiúsculas diferenciam os tratamentos em cada camada de solo e letras minúsculas diferenciam as camadas de solo, através do teste de Tukey ($p < 0,05$). NS - Não significativo. PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo do solo; PD: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto; PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto com trevo-persa como planta de cobertura.

4.3. Atributos físicos do solo

Os teores de umidade gravimétrica (UG) e volumétrica (UV) estão apresentados na **Figura 11**. A UG e a UV foram afetadas pelos tratamentos. Porém, somente na camada de 0 a 5 cm, houve menor teor de umidade no PC em relação ao PD e PD+Leg. Este resultado provavelmente está atrelado ao preparo do solo, ocorrido duas semanas antes da coleta de solo, o qual diminuiu tanto a UG como a UV no momento de coleta. Nos dois tratamentos onde não houve preparo do solo (PD e PD+Leg), a umidade foi maior e não houve diferença entre eles.

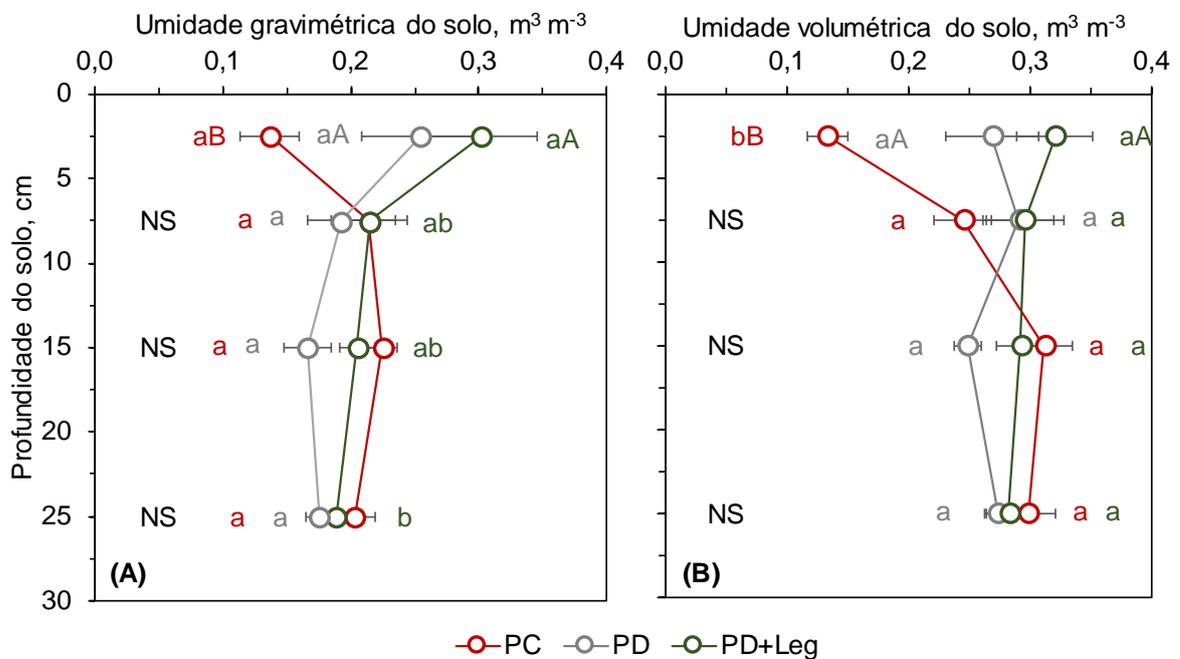


Figura 9. Umidade gravimétrica (A) e volumétrica do solo (B) no momento da coleta de solo após 3,5 anos de adoção de diferentes sistemas de produção de arroz irrigado em Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras camada indicam o erro padrão da média. Letras maiúsculas diferenciam os tratamentos em cada camada de solo e letras minúsculas diferenciam as camadas de solo, através do teste de Tukey ($p < 0,05$). NS - Não significativo. PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo do solo; PD: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto; PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto com trevo-persa como planta de cobertura.

O PC resultou em heterogeneidade da UV entre as camadas de solo. Esta diferença entre camadas de solo pode ser devido ao preparo de solo diminuir tanto a UG como a densidade do solo. Porém, neste trabalho, a densidade

(Figura 12A) para o tratamento PC foi somente distinta e menor do que os outros tratamentos na camadas de 5 a 10 cm. Já a porosidade total do solo (Figura 12B) não foi influenciada pelos tratamentos, mas entre as camadas houve maior porosidade total do solo na camada de 0-5 cm, com redução no perfil do solo.

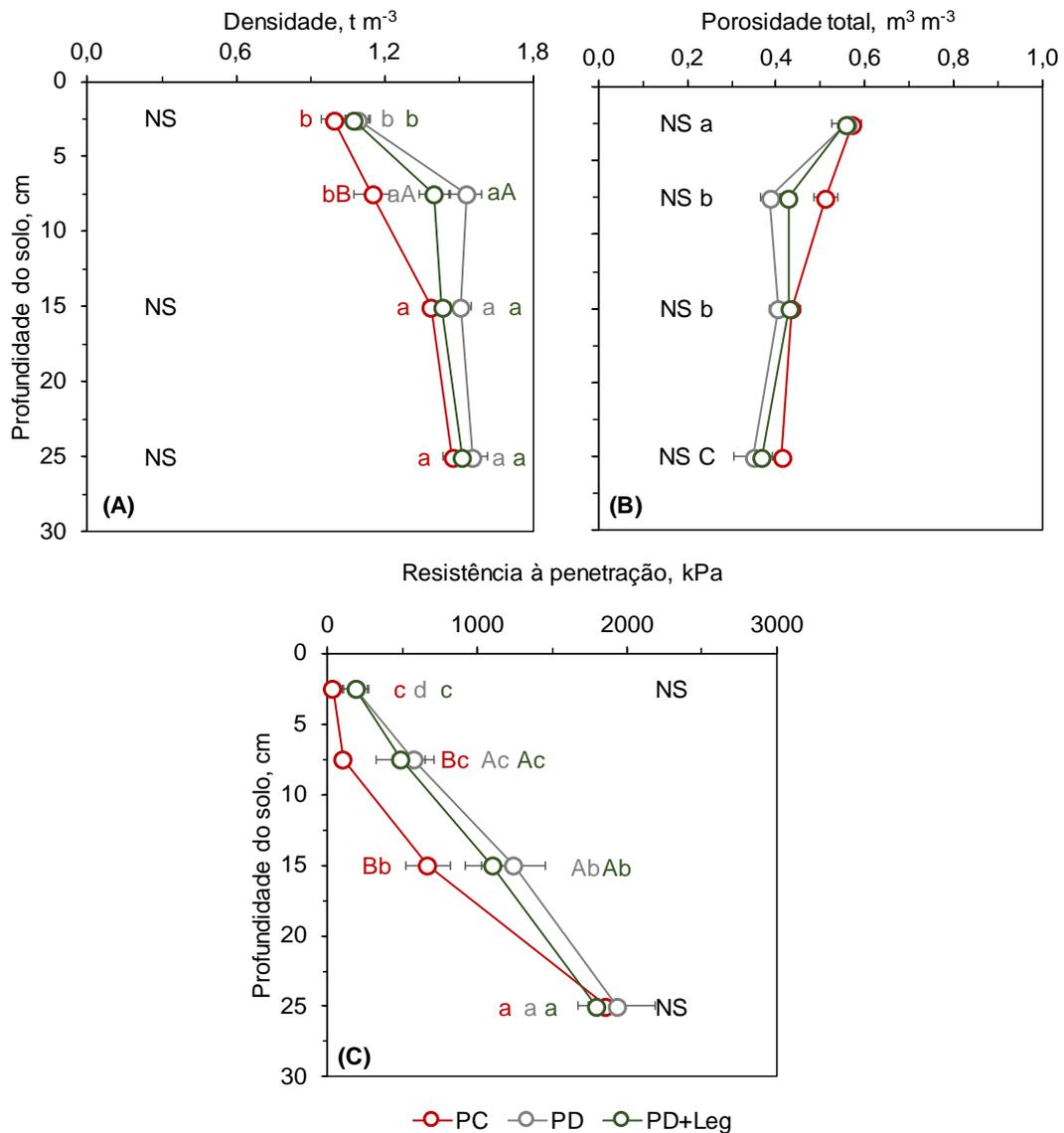


Figura 10. Densidade (A), porosidade total (B) e resistência à penetração (C) do solo em diferentes sistemas de produção de arroz irrigado após 3,5 anos de sua adoção em Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras em cada camada indicam o erro padrão da média. Letras maiúsculas diferenciam os tratamentos em cada camada de solo e letras minúsculas diferenciam as camadas de solo, através do teste de Tukey (p < 0,05). NS - Não significativo. PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo do solo; PD: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto; PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto com trevo-persa como planta de cobertura.

A densidade e a porosidade total do solo obtiveram valores inversos nas camadas de solo avaliadas. Nas camadas superficiais do solo (0 a 5 e 5 a 10 cm) houve menor densidade do solo do que nas camadas subsuperficiais (10 a 20 e 20 a 30 cm) no tratamento com preparo de solo. Em relação à densidade de partícula do solo, esta foi de $2,44 \text{ t m}^{-3}$, sem diferença entre camadas e tratamentos. Contudo, a resistência à penetração do solo (RP) foi diferente entre tratamentos. Não houve diferença entre tratamentos nas camadas de 0 a 5 e 20 a 30 cm, mas nas camadas de 5 a 10 e 10 a 20 cm, o PC apresentou menor RP do que os outros tratamentos. O preparo de solo contribuiu para a homogeneidade nas camadas superficiais (0 a 5 e 5 a 10 cm) pela ação física do revolvimento. Entretanto, o PD+Leg apresentou menor heterogeneidade para os dados de RP nas camadas de solo do que o plantio direto (PD) (**Tabela 6**). Entretanto, apesar de não haver um consenso na pesquisa sobre um valor de RP restritivo ao crescimento radicular, os valores de RP na camada de 0-30 cm estão abaixo de 2000 kPa, não havendo indícios de compactação do solo que possa prejudicar o desenvolvimento radicular das culturas agrícolas (Singh et al., 2017).

Os resultados de alguns parâmetros físicos referentes à coleta indeformada de agregados do solo estão na **Figura 13**. Os tratamentos avaliados não obtiveram efeito sobre o diâmetro médio ponderado (DMP) via úmida e via seca, a porcentagem de macroagregados via úmida e seca, os microagregados via úmida e seca e o índice de estabilidade de agregados (IEA). Apesar de menor DMP via seca e via úmida nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm, os maiores valores foram observados na camada de 10 a 20 cm e os menores na camada de 20 a 30 cm (**Figura 10A** e **Figura 10B**).

A porcentagem de microagregados do solo (**Figura 13C** e **13D**) ocorreram de forma homogênea no perfil (0 a 30 cm), sem diferenças entre camadas tanto nos microagregados via úmida como via seca. As maiores porcentagens de macroagregados via úmida ocorreram em camadas superficiais, com destaque para as camadas de 5 a 10 e 10 a 20 cm, mas sem efeito das camadas nos macroagregados via seca. O índice de estabilidade de agregados apresentou valor médio de 81,5% nas camadas de 0 a 5 até 10 a 20 cm. Na camada de 20

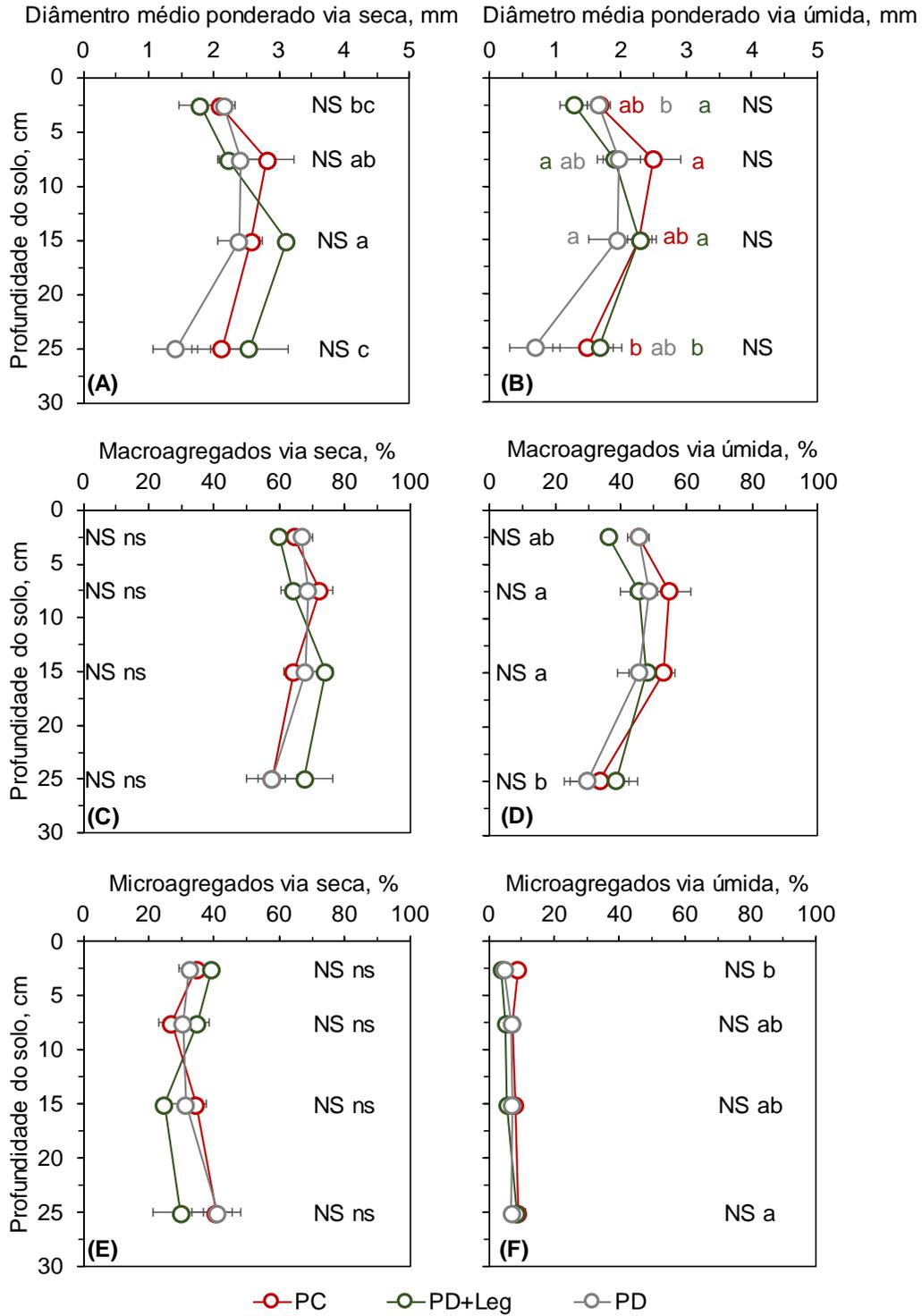


Figura 11. Diâmetro médio ponderado (DMP) por via seca (A) e via úmida (B), macro e microagregados por via seca (C) e via úmida (D) e índice de estabilidade de agregados (E) do solo após 3,5 anos de adoção em um Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras camada indicam o erro padrão da média. Letras maiúsculas diferenciam os tratamentos em cada camada de solo e letras minúsculas diferenciam as camadas em cada tratamento, através do teste de Tukey ($p < 0,05$). NS - Não significativo. PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo do solo; PD: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto; PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto com trevo-persa como planta de cobertura.

a 30 cm, houve menor estabilidade (66% de índice de estabilidade de agregados) do que as outras camadas.

No trabalho de Zang et al. (2022) avaliando o DMP via úmida de agregados do solo em diferentes solos de terras baixas e com diferentes tempos de uso da terra pelo cultivo do arroz irrigado, em sistema de cultivo pré-germinado, encontraram aumento da DMP com o aumento do uso da terra pelo cultivo de arroz irrigado. Diante dos resultados aqui levantados, é provável que os ciclos de secamento e umedecimento do solo tenham papel diferenciado na formação da estrutura do solo, possivelmente necessitando de outras abordagens para mensurar a questão da adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo sob a estrutura do solo em terras baixas.

4.4. Atributos químicos do solo

Em curto prazo, após 3,5 anos, os tratamentos não influenciaram os atributos químicos de pH-H₂O, H+Al, cálcio trocável, magnésio trocável e alumínio trocável (**Figura 15**). A área experimental em estudo tem histórico de longo período com cultivo de arroz irrigado. Apesar de recomendada a prática da calagem, áreas cultivadas com arroz irrigado apresentam baixos valores de pH (<5,5) e teores trocáveis de cálcio e magnésio (Boeni et al., 2010). Isso é devido ao fato que durante o ciclo de cultivo da cultura do arroz irrigado, ocorre a autocalagem pela irrigação por alagamento do solo e alteração no potencial redox, que acarreta aumento da disponibilidade de nutrientes na solução. De acordo com CQFS-RS/SC (2016), os teores de cálcio e magnésio trocáveis do solo estão abaixo do crítico para a cultura do arroz irrigado na camada de 0 a 20 cm.

Os teores de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis no solo estão apresentados na **Figura 16**. Não houve influência dos tratamentos nos teores de P e K em nenhuma camada de solo avaliada. No início do experimento (**Tabela 2**), o teor médio de P e K no solo era de 14 e 80 mg dm⁻³, respectivamente, na camada de 0 a 20 cm. Após 3,5 anos, a adubação de P e

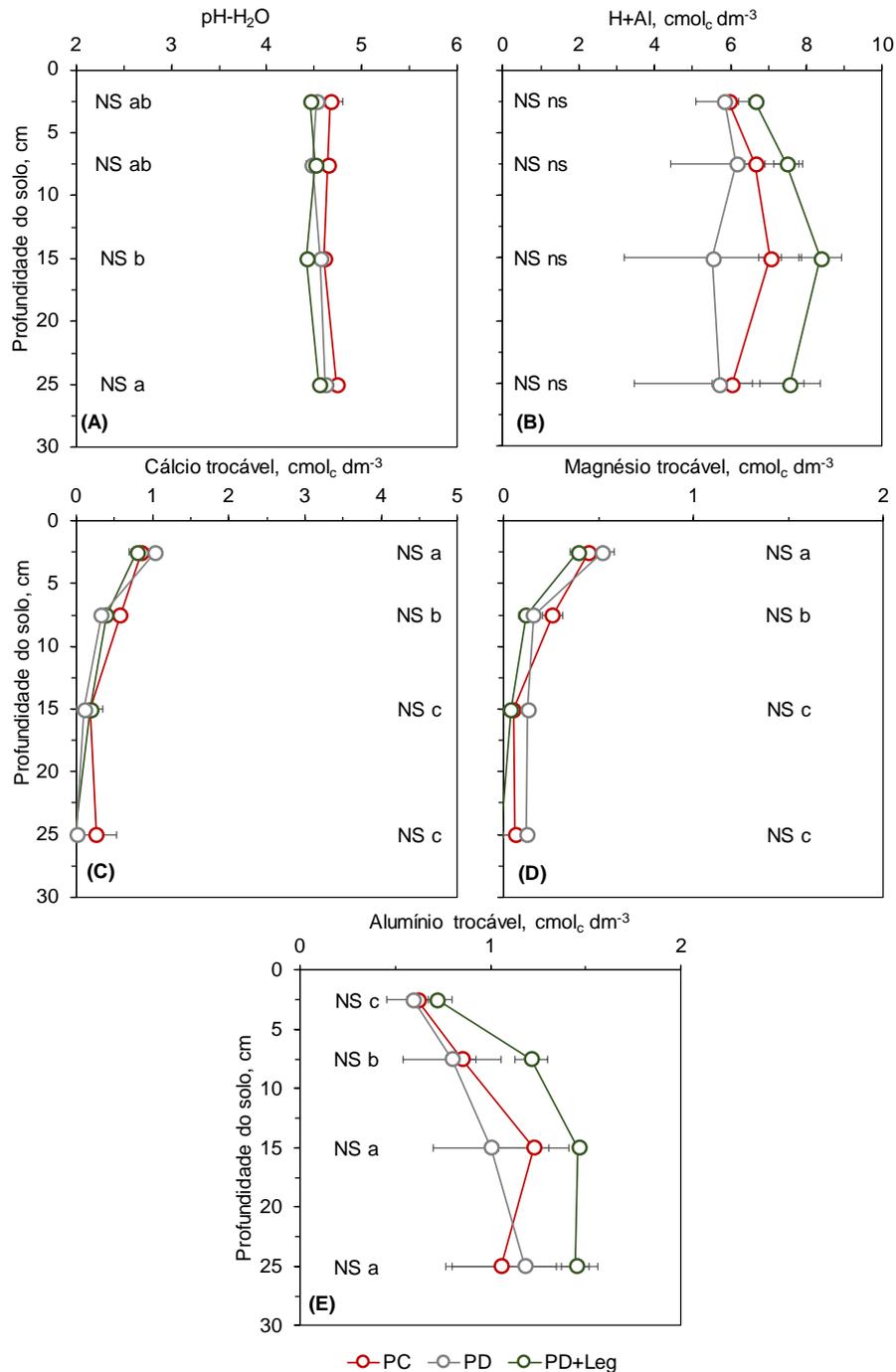


Figura 12. Valores de pH (em água, relação 1:1) (A), acidez potencial (H+Al) (B) e cálcio (Ca) (C), magnésio (Mg) (D) e alumínio (Al) (E) trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹) no solo, independentemente do sistema de produção de arroz irrigado, após 3,5 anos de sua adoção em Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras em cada camada indicam o erro padrão da média. Letras maiúsculas diferenciam os tratamentos em cada camada de solo e letras minúsculas diferenciam as camadas de solo, através do teste de Tukey (p<0,05). NS - Não significativo. PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo do solo; PD: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto; PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto com trevo-persa como planta de cobertura.

K conforme CQFS-RS/SC (2016) aumentou os teores desses nutrientes acima do teor crítico no solo para o arroz irrigado. Os seus teores no solo apresentaram

maiores valores na camada superficial (0 a 5 cm), com diminuição até a camada de 20 a 30 cm.

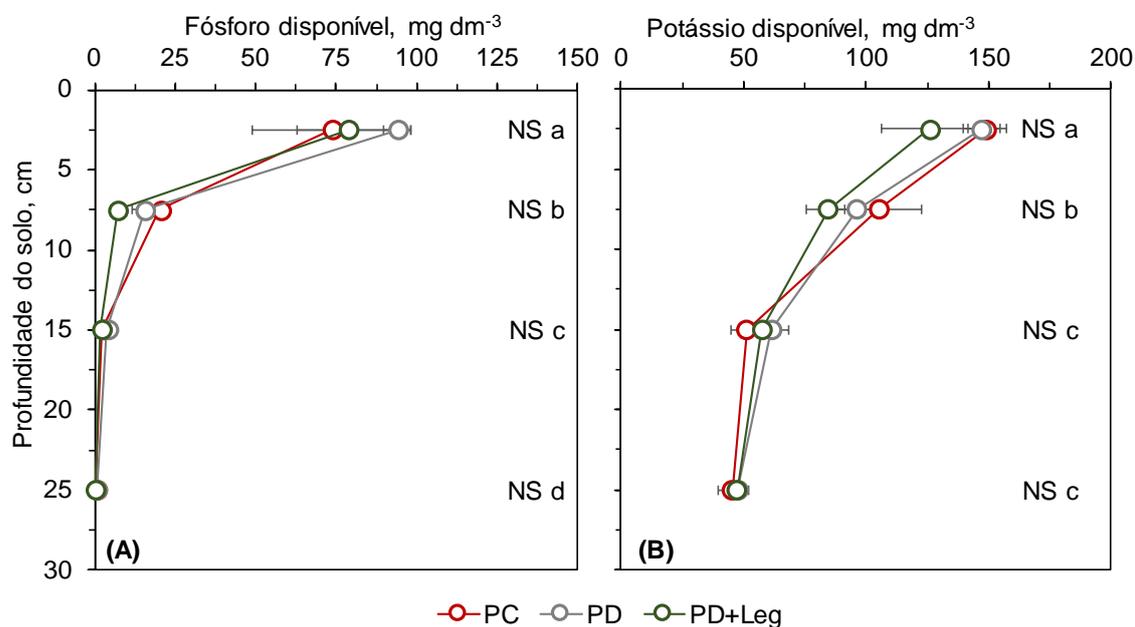


Figura 13. Teores de fósforo (P) (A) e potássio (K) (B) disponíveis (Mehlich 1) no solo, independentemente do sistema de produção de arroz irrigado, após 3,5 anos de sua adoção em Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras em cada camada indicam o erro padrão dos dados. Letras maiúsculas diferenciam os tratamentos em cada camada de solo e letras minúsculas diferenciam as camadas de solo, através do teste de Tukey ($p < 0,05$). NS - Não significativo. PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo do solo; PD: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto; PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto.

Em relação a CTC efetiva, CTC pH 7,0, saturação por Ca, Mg, Na e K e saturação por Al, os tratamentos também não tiveram efeito sobre estes atributos químicos do solo. Tanto a CTC efetiva, a CTC pH 7,0 e a saturação por Ca, Mg, Na e K apresentaram valores maiores na camada superficial (0 a 5 cm), com menores valores nas camadas subjacentes (Figuras 17A, 17B e 17C). Conseqüentemente, a saturação por Al (Figura 17D) apresentou menor valor na camada de 0 a 5 cm (26%) e maiores nas camadas de 10 a 20 e 20 a 30 cm, com 50, 72 e 78%, respectivamente.

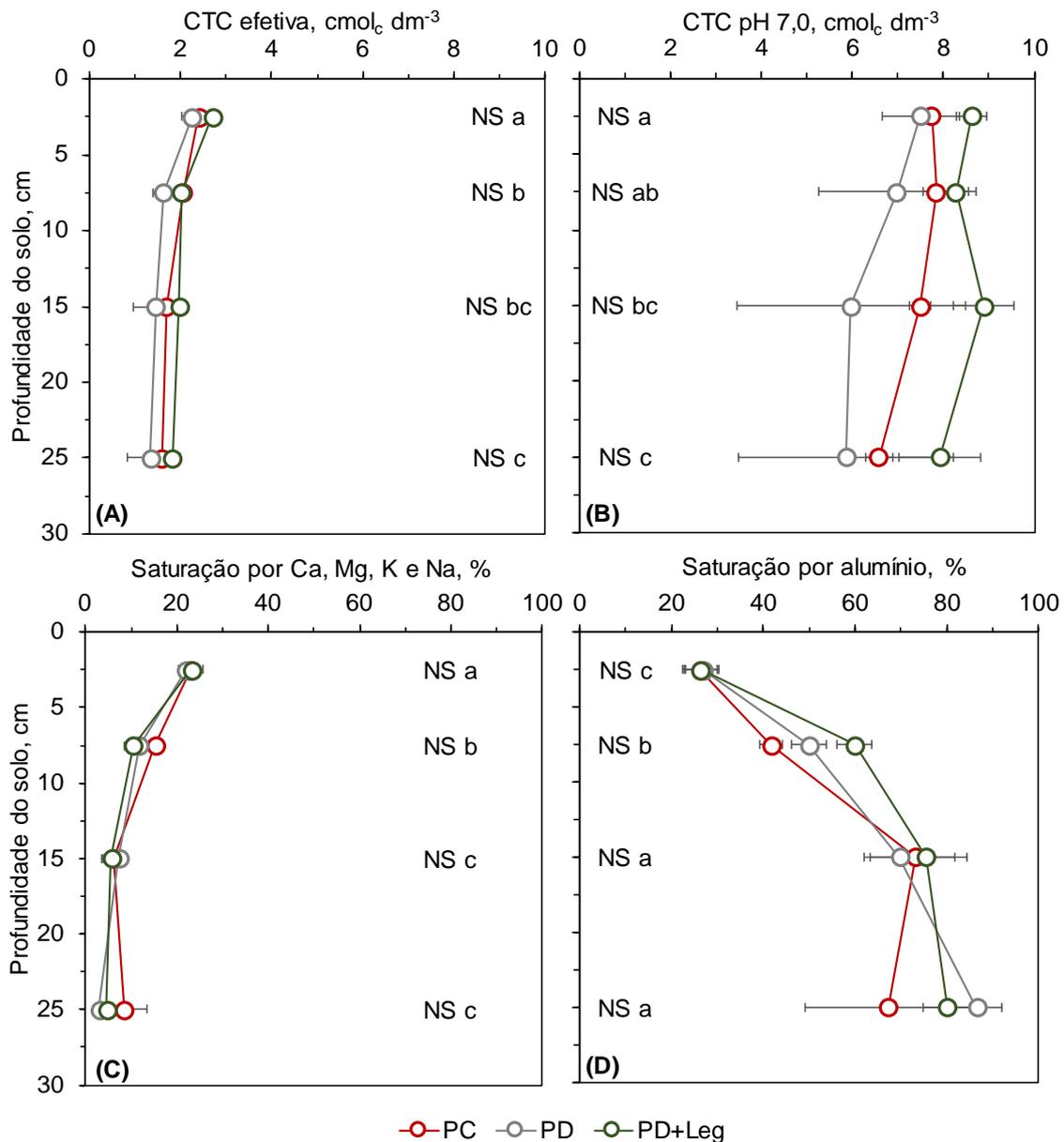


Figura 14. Valores de CTC efetiva (A), CTC pH 7,0 (B), saturação por cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K) (C) e saturação por alumínio (Al) (D), independentemente do sistema de produção de arroz irrigado, após 3,5 anos de sua adoção em Planossolo Háplico. Capivari do Sul/RS-Brasil. As barras em cada camada indicam o erro padrão dos dados. Letras maiúsculas diferenciam os tratamentos em cada camada de solo e letras minúsculas diferenciam as camadas de solo, através do teste de Tukey ($p < 0,05$). NS - Não significativo. PC: Monocultivo de arroz irrigado com preparo do solo; PD: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto; PD+Leg: Monocultivo de arroz irrigado em plantio direto com trevo-persa como planta de cobertura.

Diante dos dados químicos do solo, a correção do solo via calagem pode possibilitar ganhos em produção de matéria seca da planta de cobertura hiberna e produtividade do arroz irrigado, devido principalmente os baixos teores de pH,

cálcio e magnésio e a alta saturação por alumínio. A toxidez por alumínio no solo influencia negativamente a taxa de absorção de nutrientes essenciais devido a sua ação negativa no desenvolvimento radicular. O aumento da produção de matéria seca pela planta de cobertura reflete diretamente no acúmulo de nutrientes na sua biomassa vegetal e posterior ciclagem de nutrientes para a cultura do arroz irrigado.

É esperado que diante da introdução de práticas conservacionistas de manejo em terras baixas, principalmente com introdução de leguminosa hibernal como planta de cobertura, principalmente a recomendação de adubação nitrogenada seja reformulada. Assim como a adubação de fósforo e potássio para o arroz irrigado, visto que a introdução de uma planta leguminosa como cobertura do solo tende a beneficiar a qualidade dos resíduos aportados ao solo, e conseqüentemente a ciclagem de nutrientes. A perspectiva em longo prazo para o plantio direto em terras baixas é que o desenvolvimento e conhecimento dos atributos de solo e o manejo das plantas de cobertura hibernal abram novos caminhos para a produção orizícola brasileira. Tais práticas conservacionistas tendem a refletir em médio e longo prazo sobre a produtividade da cultura do arroz irrigado, atributos químicos, físicos e biológicos do solo e a rentabilidade e sustentabilidade da cadeia orizícola; visto que em curto prazo (3,5 anos) há indicativos de desenvolvimento dos atributos de solo, principalmente biológicos (C-CO₂ e C-BMS) e físicos (umidade gravimétrica, volumétrica, densidade do solo e resistência à penetração).

5. CONCLUSÕES

Em curto prazo (quatro anos) a adoção de práticas conservacionistas de manejo de solo em áreas de longo histórico de cultivo de arroz irrigado com preparo do solo resultaram na ausência de resposta em produtividade do arroz irrigado. Parte da ausência de resposta do arroz irrigado em produtividade pode estar relacionada a alta dose de nitrogênio (150 kg N ha^{-1}) utilizada no experimento. Porém, cabe ressaltar que em curto prazo o plantio direto com trevo-persa como planta de cobertura aumentou os teores de nitrogênio da matéria orgânica particulada nas camadas de 0-5 e 5-10 cm do solo. O aumento dos teores de nitrogênio da matéria orgânica particulada do solo em curto prazo é um indicativo de que em longo prazo a adoção desta prática pode vir a refletir na produtividade do arroz irrigado e na eficiência de uso de nutrientes em terras baixas. Ou seja, o uso de leguminosa como planta de cobertura em sucessão ao arroz irrigado deve influenciar positivamente a produtividade do arroz irrigado em médio/longo prazo.

Dentre os atributos biológicos de solo avaliados neste trabalho, em curto prazo a respiração basal diária e carbono da biomassa microbiana são beneficiados pela adoção do PD+Leg, possivelmente devido ao maior aporte de resíduos vegetais neste tratamento. O maior aporte de resíduos vegetais, e consequentemente cobertura do solo, no PD+Leg e PD também podem ter contribuído para o superior teor de umidade gravimétrica e volumétrica do solo. No PD+leg e PD houve maior densidade e resistência à penetração do solo, mas apresentando valores abaixo do que seria considerado uma compactação do solo prejudicial ao crescimento de raízes. Porém, devido ao curto prazo de condução dos tratamentos houve ausência de resposta para os atributos químicos do solo. Em sistemas de monocultivo de arroz irrigado em terras baixas, com longo histórico de preparo de solo, a adoção de práticas conservacionistas de manejo de solo em curto prazo apresenta influência principalmente nos atributos biológicos e físicos do solo, mas com ausência na resposta do arroz irrigado em produtividade e nos atributos químicos do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C.A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v.22, p. 711-28, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- ANGHINONI, I. *et al.* Adubação potássica em arroz irrigado conforme a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, p. 1481-1488, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001100009>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- BALK, B.J.; CAMARA, A.A.; DREBES, L.M. Terras arrendadas: suporte da produção de arroz irrigado no sul do Brasil. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v.11, p. 62-78, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v11i27.4087>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 105-12, 1997.
- BOENI, M. *et al.* **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA, 2010. 38 p. (Boletim Técnico, 9).
- BOHNEN, H. *et al.* Ácidos orgânicos na solução de um gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n.3, p. 475-80, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000300018>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- BORTOLON, L.; SOUSA, R.O.; BORTOLON, E.S.O. Toxidez por ácidos orgânicos em genótipos de arroz irrigado. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, n.1, p. 81-84, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/RSA.V10I1.13276>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- BUENO, C.S.; LAFARGE, T. Higher crop performance of rice hybrids than of elite inbreds in the tropics: 1. Hybrids accumulate more biomass during each phenological phase. **Field Crops Research**, [Oxford], v.112, n.2-3, p.229-237, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2009.03.006>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n.3, p.777-783, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1992.03615995005600030017X>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- CARLOS, F.S. *et al.* No-tillage promotes C accumulation in soil and a slight increase in yield stability and profitability of rice in subtropical lowland ecosystems. **Soil Research**, Collingwood, v. 60, n.6, p. 601-609, 2022a. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/SR21185>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- CARLOS, F.S. *et al.* Soybean crop incorporation in irrigated rice cultivation improves nitrogen availability, soil microbial diversity and activity, and growth of ryegrass. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 170, 104313, 2022b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104313>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- CARMONA, F. *et al.* **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária em Terras Baixas**. Porto Alegre, 2018. 158 p.

CARNEY, J.A.; WATKINS C. Arroz, protagonismo africano e a transformação ecológica das Américas. **Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Humanas**, Belém, PA, v. 16, n.2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2178-2547-BGOELDI-2020-0089>. Acesso em: 23 fev. 2023.

CHU, G. *et al.* The effect of alternate wetting and severe drying irrigation on grain yield and water use efficiency of Indica-japonica hybrid rice (*Oryza sativa* L.). **Food Energy Security**, [Oxford], v.7, n.2, 2018. <https://doi.org/10.1002/FES3.133>. Acesso em: 23 fev. 2023.

COELHO, J.D. **Arroz: produção e mercado**. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2021. (Caderno Setorial ETENE, n. 156).

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2022/23: 9º Levantamento da safra brasileira. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/safra-graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 20/01/2023. Acesso em: 23 fev. 2023.

CONCEIÇÃO, P.C. *et al.* Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.5, p. 794-800, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014005000004>. Acesso em: 23 fev. 2023.

COTRUFO, M.F. *et al.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, Oxford, v.19, n.4, p. 988-995, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>. Acesso em: 23 fev. 2023.

CQFS-RS/SC – Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT, 2016.

DATER-IRGA. **Boletim de resultados da safra 2021/22 em terras baixas: arroz irrigado e soja**. Cachoeira do Sul, 2022.

DENARDIN, L.G. *et al.* No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, p. 64-69, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.006>. Acesso em: 23 fev. 2023.

DENARDIN, L.G. *et al.* Integrated crop–livestock systems in paddy fields: New strategies for flooded rice nutrition. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, n.3, p. 2219-2229, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20148>. Acesso em: 23 fev. 2023.

FREITAS, T.F.S. Produtividade de arroz irrigado e eficiência da adubação nitrogenada influenciadas pela época da semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p.2397-2405, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600018>. Acesso em: 23 fev. 2023.

GARCIA, A.V. **Respostas de solo e planta ao uso de leguminosa hibernal na produção de arroz irrigado em semeadura direta**. 2020. 51 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Brasília, 2023. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html>. Acesso em: 08 jan. 2023.

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **Fundamentos, manejo e perspectivas da produção de arroz irrigado de base ecológica no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha, 2020. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/fundamentos-manejo-e-perspectivas-da-producao-de-arroz-irrigado-de-base-ecologica-no-rs>. Acesso em: 08 jan. 2023.

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **Projeto 10+**. Cachoeirinha, 2017. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/areas-internet-livre>. Acesso em: 08 jan. 2023

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **Históricos de produção e produtividade**. Cachoeirinha, 2022. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/historicos>. Acesso em: 08 jan. 2023

JOHNSON, D.W.; CURTIS, P.S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 140, n.2-3, p.227-238, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00282-6). Acesso em: 23 fev. 2023.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size Distribution of Aggregates. *In*: METHODS of Soil Analysis: Part 1. [Madison]: ASA, 1965. p. 499-510. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c39>. Acesso em: 23 fev. 2023.

MARTIN, T.N.; PIRES, J.L.F.; VEY, R.T. **Tecnologias Aplicadas para o Manejo Rentável e Eficiente da Cultura da Soja**. Santa Maria: Editora GR, 2022. p. 530,

MEENA, R.S.; LAL, R. Legumes and Sustainable Use of Soils. MEENA, R.S. *et al.* (Ed.). **Legumes for Soil Health and Sustainable Management**. Singapore: Springer, 2018. p. 1-31. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_1. Acesso em: 23 fev. 2023.

MENDONÇA, E.D.S.; MATOS, E.D.S. **Matéria Orgânica do Solo**: Métodos de Análises. Viçosa: Livraria UFV, 2005.

SILVA, I; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n.1, p. 113-117, 1997.

NABINGER, C.; SANT'ANNA, D.M. Arroz do litoral norte gaúcho: primeira denominação de origem brasileira. *In*: INDICAÇÕES Geográficas Do Rio Grande Do Sul Registradas Até Março de 2021. Brasília, DF: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2022. p. 53-70.

NASCIMENTO, P.C. *et al.* Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n.6, p. 1821-1827, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600030>. Acesso em: 23 fev. 2023.

PARFITT, J.M.B. *et al.* Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 819-830, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400007>. Acesso em: 23 fev. 2023.

REDIN, M. *et al.* Root and Shoot Contribution to Carbon and Nitrogen Inputs in the Topsoil Layer in No-Tillage Crop Systems under Subtropical Conditions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,

Viçosa, v. 42, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657RBCS20170355>. Acesso em: 23 fev. 2023.

REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 32., 2018, Farroupilha, RS. **Arroz Irrigado** - Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Cachoeirinha, RS: SOSBAI, 2018, 205 p.

SÁ, J.C. M. *et al.* Organic Matter Dynamics and Carbon Sequestration Rates for a Tillage Chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n.5, p.1486-1499, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2001.6551486X>. Acesso em: 23 fev. 2023.

SALTON, J.C. *et al.* Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n.1, p. 11-21, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100002> Acesso em: 23 fev. 2023.

SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2018.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Campinas, v. 21, n.1, p. 113-117, 1997.

SILVA, J.P. *et al.* Combined legume and non-legume residues management improve soil organic matter on an Oxisol in Brazil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46., e0220077, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657RBCS20220077> Acesso em: 23 fev. 2023.

SINGH, S.P. *et al.* Depth of soil compaction predominantly affects rice yield reduction by reproductive-stage drought at varietal screening sites in Bangladesh, India, and Nepal. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 417, n.1-2, p. 377-392, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S11104-017-3265-2>. Acesso em: 23 fev. 2023.

SOUSA, R.O. *et al.* No-tillage for flooded rice in Brazilian subtropical paddy fields: history, challenges, advances and perspectives. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.45, e0210102, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657RBCS20210102>. Acesso em: 23 fev. 2023.

STRECK, E.V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2018.

TEDESCO, M.J. *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995.

TEIXEIRA, P.C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília, DF, 2017.

VELOSO, M.G., CECAGNO, D., BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 190, p. 139-146, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.003>. Acesso em: 23 fev. 2023.

VELOSO, M.G. *et al.* Cropping systems including legume cover crops favour mineral-organic associations enriched with microbial metabolites in no-till soil. **Soil Research**, Collingwood, v. 57, n.8, p. 851-858., 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/SR19144> Acesso em: 23 fev. 2023.

WEINERT, C., *et al.* Legume winter cover crop (Persian clover) reduces nitrogen requirement and increases grain yield in specialized irrigated hybrid rice system. **European Journal of**

Agronomy, Amsterdam, v. 142, 126645, jan. 2023. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/J.EJA.2022.126645>. Acesso em: 23 fev. 2023.

ZANATTA, J.A. *et al.* Carbon indices to assess quality of management systems in a Subtropical Acrisol. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 76, n.6, p. 501-508, 2019. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0322>. Acesso em: 23 fev. 2023.

ZANG, M. *et al.* Soil quality in hydromorphic ecosystems decrease with intensification of pre-germinated rice production, even under ecologically based production system. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 31, e00582, 2022. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00582>. Acesso em: 23 fev. 2023.

7. APÊNDICES



Apêndice A. Tamanho e delimitação espacial dos blocos e dos tratamentos avaliados na área experimental. MC-PS = PC; MC-SD = PD; MC-PD = PD+Leg.

Apêndice B. Níveis de significância das fontes de variação “sistema” (S) e “camada de solo” (C) e sua interação (S*C) para as variáveis analisadas no experimento. Capivari do Sul/RS-Brasil.

Variáveis	S	C	S*C
Produtividade do Arroz Irrigado	ns	-	-
Resíduo parte aérea arroz irrigado	ns	-	-
Resíduo raiz arroz irrigado	ns	-	-
Resíduo parte aérea plantas período hibernar	***	-	-
Resíduo raiz plantas período hibernar	***	-	-
Aporte anual C – arroz irrigado e plantas hib.	***	-	-
C-CO ₂ do solo	***	-	-
C-BMS do solo	**	-	-
N-BMS do solo	ns	-	-
Relação CN-BMS do solo	ns	-	-
qCO ₂ do solo	ns	-	-
Umidade gravimétrica do solo	.	*	**
Umidade volumétrica do solo	.	*	**
Densidade do solo	.	**	*
Densidade de partícula do solo	ns	ns	ns
Porosidade total do solo	ns	**	ns
Resistência à penetração do solo	.	**	*
DMP via seca dos agregados do solo	ns	*	ns
DMP via úmida dos agregados do solo	ns	***	*
Macroagregados do solo via seca	ns	ns	ns
Macroagregados do solo via úmida	ns	**	ns
Microagregados do solo via seca	ns	ns	ns
Microagregados do solo via úmida	ns	*	ns
Índice de estabilidade de agregados do solo	ns	***	ns
pH do solo	ns	*	ns
H + Al do solo	ns	ns	ns
Alumínio trocável do solo	ns	**	ns
Fósforo disponível do solo	ns	**	ns
Potássio disponível do solo	ns	**	ns
Sódio disponível do solo	ns	ns	ns
Cálcio trocável do solo	ns	**	ns
Magnésio trocável do solo	ns	**	ns
CTC efetiva do solo	ns	**	ns
CTC pH 7,0 do solo	ns	**	ns
Saturação por Ca, Mg, K, Na do solo	ns	**	ns
Saturação por alumínio do solo	ns	**	ns

“ns” não significativo; “-” não entrou no modelo estatístico; “.” *p*-valor < 0,10; “*” *p*-valor < 0,05; “**” *p*-valor < 0,001; “***” *p*-valor < 0,0001; E-CO₂ – Emissão de gás carbônico pela biomassa microbiana; C-BMS – Carbono da biomassa microbiana; N-BMS – Nitrogênio da biomassa microbiana do solo; Relação CN – Relação Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo; qCO₂ Quociente metabólico da biomassa microbiana do solo; DMP – Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo; CTC – Capacidade de troca de cátions do solo.