

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

**Bruno Behenck Aramburu**

**PRODUTIVIDADE DE GRÃOS, DA ÁGUA E EMISSÃO DE GASES DE  
EFEITO ESTUFA SOB PRÁTICAS ALTERNATIVAS DE IRRIGAÇÃO  
EM ARROZ**

Santa Maria, RS  
2021

**Bruno Behenck Aramburu**

**PRODUTIVIDADE DE GRÃOS, DA ÁGUA E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO  
ESTUFA SOB PRÁTICAS ALTERNATIVAS DE IRRIGAÇÃO EM ARROZ**

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

Orientador: Prof. Dr. Enio Marchesan

Santa Maria, RS  
2021

ARAMBURU, BRUNO BEHENCK

PRODUTIVIDADE DE GRÃOS, DA ÁGUA E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA SOB PRÁTICAS ALTERNATIVAS DE IRRIGAÇÃO EM ARROZ / BRUNO BEHENCK ARAMBURU.- 2021.

83 p.; 30 cm

Orientador: ENIO MARCHESAN

Coorientador: FERNANDO TEIXEIRA NICOLOSO

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Agronomia, RS, 2021

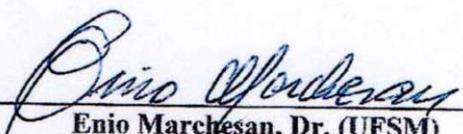
1. Intermitência 2. Aspersão 3. Produtividade 4. Qualidade de grãos 5. Gases de efeito estufa I. MARCHESAN, ENIO II. NICOLOSO, FERNANDO TEIXEIRA III. Título.

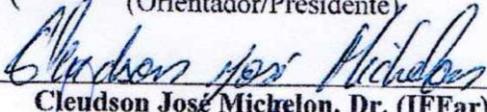
**Bruno Behenck Aramburu**

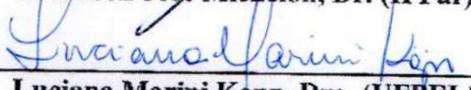
**PRODUTIVIDADE DE GRÃOS, DA ÁGUA E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA SOB PRÁTICAS ALTERNATIVAS DE IRRIGAÇÃO EM ARROZ**

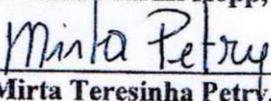
Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Agronomia**.

Aprovado em 26 de novembro de 2021

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

  
Cleudson José Michelon, Dr. (IFFar) - Videoconferência

  
Luciana Marini Kopp, Dra. (UFPEL) - Videoconferência

  
Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM) - Videoconferência

  
Sandro José Giacomini, Dr. (UFSM) - Videoconferência

Santa Maria, RS  
2021

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho a minha família, em especial a minha mãe Zoraide Maria Behenck Aramburu, ao meu irmão Arthur Behenck Aramburu e a minha namorada Janine Gudolle de Souza por todo amor, apoio e incentivo recebidos durante o caminho dessa jornada.*

*Amo vocês!*

*Dedico e ofereço.*

## AGRADECIMENTOS

*Eis que chegou o momento de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma ou outra, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional durante esses anos de muito aprendizado.*

*À minha mãe Zoraide Maria Behenck Aramburu e ao meu irmão Arthur Behenck Aramburu por todo amor, apoio e principalmente por acreditarem nos meus sonhos e estarem sempre ao meu lado durante as mais importantes escolhas da minha vida.*

*À minha namorada Janine Gudolle de Souza, pelo amor, apoio e compreensão nos momentos mais difíceis dessa jornada.*

*Ao meu orientador professor Dr. Enio Marchesan, pelo exemplo de profissional, orientação e ensinamentos que muito me auxiliaram ao longo de todos esses anos.*

*Aos bolsistas Matias Henrique Prochnow e Júlian Gabriel Pfeifer pela amizade e por todo apoio prestado durante o desenvolvimento do trabalho.*

*Aos colegas de pós-graduação Gabriel Donatto, Lucas Lopes Coelho, Alisson Guilherme Fleck e Daivyd Silva de Oliveira, pela convivência, troca de experiências, e auxílio na condução dos trabalhos.*

*Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Arroz irrigado, Anna Kasburg, Augusto Dubou Serafin, Eduardo Iansen Cassanego, Gilmar Gabriel Silva do Monte, Mariana Miranda Wruck, Tiago Weise, Uashington da Silva Riste e Zanandra Zanini Tamiosso, muito obrigado pela amizade e por toda a ajuda para que obtivéssemos êxito na conclusão dessa etapa.*

*À Eng. Agr. MSc. Caren da Rosa e ao Eng. Agr. Dr. Robson Giacomeli, pela amizade, companheirismo, e auxílio durante a condução do trabalho.*

*À comissão examinadora, Enio Marchesan, Cleudson José Michelin, Luciana Marini Kopp, Mirta Teresinha Petry e Sandro José Giacomini, pelas contribuições no trabalho.*

*À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia representados pelos professores e funcionários que nestas se dedicam ao ensino e trabalham para a formação de profissionais.*

*A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização do meu trabalho, e não estão citados.*

*A todos meu sincero **MUITO OBRIGADO!***

## RESUMO

### PRODUTIVIDADE DE GRÃOS, DA ÁGUA E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA SOB PRÁTICAS ALTERNATIVAS DE IRRIGAÇÃO EM ARROZ

AUTOR: Bruno Behenck Aramburu

ORIENTADOR: Enio Marchesan

As áreas de terras baixas da metade Sul do Rio Grande do Sul são predominantemente cultivadas com a cultura do arroz irrigado por superfície no sistema de inundação contínua. Esse método de irrigação se caracteriza pela baixa eficiência do uso da água e elevada emissão de gases de efeito estufa. Diante do atual cenário de mudanças climáticas e escassez de água, a busca por métodos e/ou sistemas de irrigação alternativos que sejam eficientes quanto ao uso da água, que promovam elevado rendimento e qualidade dos grãos produzidos, bem como proporcionem redução da emissão de gases de efeito estufa tem sido um desafio constante à pesquisa e ao setor produtivo. Nesse sentido, a irrigação por superfície no sistema de inundação intermitente e por aspersão surgem como alternativas à tradicional irrigação por inundação, visando a redução do uso de água e menor impacto ambiental. Embora esses métodos de irrigação possam promover redução do uso da água, as plantas podem ser afetadas negativamente pela redução da disponibilidade hídrica. Quando associada a condições de elevada demanda evapotranspirativa, a redução na disponibilidade de água provocada por práticas alternativas de irrigação, podem provocar alterações morfofisiológicas em plantas de arroz, promovendo redução do seu crescimento e desenvolvimento, com reflexos sobre o rendimento e a qualidade de grãos da cultura. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho agrônomo e as modificações morfofisiológicas de cultivares de arroz submetidas a diferentes métodos e sistemas de irrigação, bem como sua influência sob a produtividade da água de irrigação (Capítulo I); avaliar os componentes do rendimento e a qualidade de grãos de cultivares de arroz submetidas a métodos e sistemas de irrigação (Capítulo II), bem como a influência de métodos e sistemas de irrigação sobre as emissões de metano e de óxido nitroso, o potencial de aquecimento global parcial e a relação com a produtividade de grãos de cultivares de arroz irrigado (Capítulo III). Para isso, foram conduzidos experimentos nas safras 2019/20 e 2020/21 na área didático-experimental de terras baixas da Universidade Federal de Santa Maria. Como principais resultados obtidos, verificou-se que a irrigação intermitente proporciona redução do uso de água sem prejuízo a produtividade e a qualidade de grãos de arroz. Ainda, devido a intensidade da intermitência utilizada, a emissão de metano e óxido nitroso não foram afetadas, sendo o PAGp/PG semelhante ao verificado pela irrigação contínua. A irrigação por aspersão promove redução do uso de água, no entanto, com redução do acúmulo de matéria seca da parte aérea e de raiz, do acúmulo de nutrientes, dos parâmetros relacionados à fotossíntese, do número de grãos por panícula e da produtividade de grãos. Além disso, a irrigação por aspersão obteve maior percentual de grãos opacos e gessados e reduziu o rendimento de grãos inteiros de arroz. Quanto a emissão de gases de efeito estufa, a aspersão proporcionou a redução da emissão de metano do solo em cultivo de arroz, porém, potencializou as emissões de óxido nitroso. A cultivar IRGA 431 CL proporciona redução do uso de água e maior produtividade da água de irrigação, sem prejuízo a produtividade de grãos, com menor percentual de grãos opacos e gessados e maior rendimento de grãos inteiros quando comparado a cultivar IRGA 424 RI. Os fluxos e a emissão total de metano e óxido nitroso, bem como o potencial de aquecimento global parcial não foram influenciados pelas cultivares de arroz, contendo valores semelhantes de PAGp/PG.

**Palavras-chave:** Intermitência. Aspersão. Produtividade. Qualidade de grãos. Metano. Óxido nitroso.

## ABSTRACT

### GRAIN AND WATER YIELD AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS UNDER ALTERNATIVE RICE IRRIGATION PRACTICES

AUTHOR: Bruno Behenck Aramburu

ADVISOR: Enio Marchesan

The lowland areas of the southern part of Rio Grande do Sul are predominantly cultivated with border irrigated rice in the continuous flooding system. This irrigation method is characterized by low water use efficiency and high greenhouse gas emissions. Given the current scenario of climate change and water scarcity, the seek for alternative irrigation methods and/or systems that are efficient in the water use, that promote high yield and quality of the grains produced, as well as provide a reduction in gas emissions greenhouse effect has been a constant challenge to research and the productive sector. In this sense, border irrigation methods in intermittent flooding and sprinkler systems emerge as alternatives to traditional flood irrigation, aiming to reduce water use and lessen environmental impact. Although these irrigation methods can promote a reduction in water use, plants can be affected by the reduction in water availability. When associated with conditions of high evapotranspiration demand, they can cause morphophysiological changes in rice plants, promoting a reduction in their growth and development, with effects on the yield and quality of the crop's grains. Thus, the present study aimed to evaluate the agronomic performance and morphophysiological modifications of rice varieties subjected to different irrigation methods and systems, as well as their influence on irrigation water productivity (Chapter I); evaluate yield components and grain quality of rice varieties subjected to irrigation methods and systems (Chapter II), as well as the influence of irrigation methods and systems on methane and nitrous oxide emissions, global warming partial potential and the relation with grain yield of irrigated rice varieties (Chapter III). For this, experiments were carried out in the 2019/20 and 2020/21 growing seasons in the lowlands didactic-experimental area at the Federal University of Santa Maria. As the main results obtained, it was verified that intermittent irrigation provides a reduction in the use of water without harming the productivity and quality of rice grains. However, due to the intensity of the intermittence used, the emission of methane and nitrous oxide were not affected, being the PAGp/PG similar to that verified by continuous irrigation. Sprinkler irrigation promotes reduced water use, however, with a reduction in shoot and root dry matter accumulation, nutrient accumulation, parameters related to photosynthesis, number of grains per panicle and grain yield. In addition, sprinkler irrigation had a higher percentage of opaque and plastered grains and reduced whole grain rice yield. As for the emission of greenhouse gases, the sprinkler provided a reduction in the emission of methane from the soil in rice cultivation, however, it increased the emissions of nitrous oxide. Variety IRGA 431 CL provides reduced water use and higher irrigation water productivity, without harming grain yield with lower percentage of opaque and plastered grains and higher whole grain rice yield than variety IRGA 424 RI. The fluxes and total emission of methane and nitrous oxide, as well as the partial global warming potential were not influenced by rice varieties, containing similar values of PAGp/PG.

**Key words:** Intermittency. Sprinkling. Yield. Grain quality. Methane. Nitrous oxide.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 1 - Conteúdo volumétrico de água no solo no método de irrigação por aspersão cultivado com arroz nas safras agrícolas 2019/20 (A) e 2020/21 (B).  $\theta_{SAT}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na saturação.  $\theta_{CC}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na capacidade de campo.....20
- Figura 2 - Matéria seca da parte aérea (A e B) e de raiz na camada de 0-0,1m (C e D) e na camada de 0,1-0,2m (E) nos estádios fenológicos V6 e R4 das cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos e sistemas de irrigação nas safras 2019/20 (A e C) e 2020/21 (B, D e E).....23
- Figura 3 - Acúmulo de N (A e B), P (C e D) e K (E e F) na parte aérea das plantas de arroz irrigado nos estádios fenológicos V6 e R4 das cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos e sistemas de irrigação nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2020/21 (B, D e F).....25
- Figura 4 - Densidade (A), porosidade total (B), macroporosidade (C), microporosidade (D) e capacidade de água disponível no solo (E) nas camadas de 0,0–0,5, 0,05–0,1, 0,1–0,15, 0,15–0,2 e 0,2–0,3 no método de irrigação por aspersão em solo escarificado e não escarificado.....26
- Figura 5 - Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) nas safras 2019/20 (A) e 2020/21 (B).....28
- Figura 6 - Taxa de assimilação líquida de carbono (A), concentração intracelular de CO<sub>2</sub> (B), taxa de transpiração (C) e condutância estomática (D) de plantas de arroz irrigado no estágio R0 das cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431 CL, em função de métodos e sistemas de irrigação nas safras 2019/20 e 2020/21.....28

### CAPÍTULO II

- Figura 1 - Conteúdo volumétrico de água no solo no método de irrigação por aspersão cultivado com arroz nas safras agrícolas 2019/20 (A) e 2020/21 (B). Precipitação pluviométrica e evapotranspiração diária da cultura (ET<sub>c</sub>) nas safras 2019/20 (C) e 2020/21 (D).  $\theta_{SAT}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na saturação.  $\theta_{CC}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na capacidade de campo.....52
- Figura 2 - (A) Número de panículas por m<sup>2</sup>, (B) número de grãos por panícula, (C) massa de mil grãos, (D) esterilidade de espiguetas e produtividade relativa (E) das cultivares de arroz irrigado IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos de irrigação nas safras 2019/20 e 2020/21.....53
- Figura 3 - (A) Renda do benefício, (B) grãos inteiros, (C) grãos opacos e (D) grãos gessados das cultivares de arroz irrigado IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos de irrigação nas safras 2019/20 e 2020/21.....54

### CAPÍTULO III

- Figura 1 - Conteúdo volumétrico de água no solo no método de irrigação por aspersão cultivado com arroz nas safras agrícolas 2019/20 (A) e 2020/21 (B).  $\theta_{SAT}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na saturação.  $\theta_{CC}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na capacidade de campo.....78
- Figura 2 - Fluxo médio diário (A, B, C e D), emissão acumulada de CH<sub>4</sub> do solo sob métodos de irrigação e cultivares de arroz irrigado (E e F) nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2020/21 (B, D e F).....79
- Figura 3 - Fluxo médio diário (A, B, C e D), emissão acumulada de N<sub>2</sub>O do solo sob métodos de irrigação e cultivares de arroz irrigado (E e F) nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2020/21 (B, D e F).....80
- Figura 4 - Potencial de aquecimento global parcial (A e B), produtividade (C e D) e índice PAGp/GP de métodos de irrigação e cultivares de arroz nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2020/21 (B, D e F).....81

## **LISTA DE TABELAS**

### **CAPÍTULO I**

Tabela 1 - Produtividade de grãos, produtividade da água e volume de água utilizado para irrigação das cultivares de arroz irrigado IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos e sistemas de irrigação nas safras 2019/20 e 2020/21.....	30
--	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 CAPÍTULO I (Artigo Científico) .....</b>	<b>16</b>
INTRODUÇÃO .....	17
MATERIAL E MÉTODOS .....	19
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	22
CONCLUSÕES .....	33
LITERATURA CITADA .....	33
<b>3 CAPÍTULO II (Artigo Científico) .....</b>	<b>36</b>
INTRODUÇÃO .....	37
MATERIAL E MÉTODOS .....	39
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
CONCLUSÃO .....	47
REFERÊNCIAS .....	48
<b>4 CAPÍTULO III (Artigo Científico) .....</b>	<b>55</b>
INTRODUÇÃO .....	57
MATERIAL E MÉTODOS .....	59
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63
CONCLUSÃO .....	71
REFERÊNCIAS .....	72
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a maior parcela da produção de arroz é proveniente do ecossistema várzea, onde a orizicultura irrigada é responsável por 75% da produção nacional. O método de irrigação utilizado tradicionalmente é o de superfície, no sistema de inundação contínua, em que uma lâmina de água é mantida sobre a superfície do solo por cerca de 80 a 100 dias, utilizando-se um volume de água entre 5.000 a 15.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, dependendo do tipo de solo, ciclo da cultura e das condições meteorológicas durante o período de cultivo (Massey et al., 2014; Avila et al., 2015; Carracelas et al., 2019). Embora esse método de irrigação esteja associado a diversos benefícios à cultura do arroz, como o controle de plantas daninhas, o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo e o isolamento/proteção térmica durante a microsporogênese, está vinculado a uma série de demandas, incluindo o elevado uso da água, baixa produtividade da água de irrigação e elevada emissão de gases de efeito estufa (GEE). Nesse sentido, diante do atual cenário de mudanças climáticas e de escassez de água, a busca por métodos e/ou sistemas de irrigação alternativos que sejam eficientes quanto ao uso da água, que mitiguem a emissão de GEE e que mantenham o rendimento e a qualidade de grãos de arroz tem sido um desafio constante à pesquisa e ao setor produtivo.

Um sistema de irrigação alternativo consiste em suprimir temporariamente o fornecimento de água à lavoura, permitindo a redução na altura da lâmina de água até atingir o nível próximo ou igual ao do solo. Desta forma, o solo permanece com presença de lâmina de água ou pelo menos saturado durante todo o ciclo da cultura. Esse método, denominado irrigação por superfície com fornecimento intermitente de água, pode ser utilizado ao longo de todo o ciclo de cultivo, conferindo economia do uso de água que pode variar de 22 a 76%, sem prejuízo para o rendimento de grãos (Massey et al., 2014; Avila et al., 2015; Carracelas et al., 2019). Outra possibilidade desse sistema de irrigação é que, dependendo da intensidade da intermitência utilizada, o mesmo permite o aumento da oxigenação do sistema, ocorrendo a oxidação do metano (CH<sub>4</sub>) retido no solo e reduzindo a sua emissão para a atmosfera. Contudo, ciclos alternados de anaerobiose e aerobiose favorecem a redução das emissões de CH<sub>4</sub>, mas aumentam as de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), quando comparados às condições de alagamento contínuo.

Outro método de irrigação com efeitos positivos sobre a economia do uso água é o de irrigação por aspersão. Nesse caso, o arroz é cultivado durante todo o ciclo em solo aerado, embora a umidade seja mantida o mais próximo possível da saturação, podendo proporcionar uma redução no uso de água de até 50% em comparação ao método tradicional de irrigação

por inundação contínua. Além disso, esse método de irrigação não deve ser favorável à produção de  $\text{CH}_4$ , pois o solo é mantido oxidado; no entanto, deve estar sujeito a maiores emissões de  $\text{N}_2\text{O}$ , uma vez que possibilita a alternância dos processos de nitrificação/desnitrificação, que têm como produto intermediário esse gás de efeito estufa.

Apesar da redução substancial do uso de água, a conversão para o método de irrigação por aspersão promove mudanças ao ambiente e ao sistema de produção do arroz, o que exige adequações no manejo da cultura. Um aspecto importante é que na condição oxidada do solo não estão presentes modificações químicas e biológicas causadas pela inundação e que beneficiam a cultura do arroz, o que pode ter consequências sobre a produtividade de grãos. Outro aspecto está relacionado às condições físicas naturalmente desfavoráveis desses solos, como a presença de camada compactada próxima a superfície, as quais podem restringir o crescimento de raízes e limitar a disponibilidade de água às plantas. Dessa forma, práticas de manejo que possibilitem a melhoria dos atributos físicos do solo, como a escarificação, tornam-se importantes para o adequado desempenho agrônômico da cultura nesse sistema de cultivo.

Embora os métodos alternativos de irrigação possibilitem a redução do uso de água e afetem a dinâmica da emissão de GEE, a redução da disponibilidade hídrica às plantas pode provocar modificações morfofisiológicas, como alterações no mecanismo de ajustamento estomático foliar, o qual, tende a minimizar a perda de água por transpiração ao mesmo tempo em que tenta manter a captura de carbono ( $\text{CO}_2$ ) utilizado na assimilação, causando redução do índice de área foliar, redução da taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  e da taxa de fotossíntese, resultando em redução do rendimento de grãos da cultura.

Além da manutenção do rendimento de grãos, a qualidade do grão deve ser considerada, pois é um fator fundamental para a sua comercialização, visto que grãos inteiros e sem defeitos (opacos e gessados) possuem maior valor de mercado. O rendimento de grãos inteiros é influenciado por fatores como a genética, as condições ambientais em que a planta é cultivada, umidade de colheita e pelos processos mecânicos de beneficiamento. Estudos indicam que a ocorrência de estresse hídrico, principalmente na fase reprodutiva, pode promover prejuízos à qualidade de grãos produzidos, resultando em maior percentual de área gessada no grão e redução do rendimento de grãos inteiros (SINGH et al., 2017; LAWAS et al., 2018).

Outra estratégia que pode ser associada aos métodos de irrigação, visando a racionalização dos recursos hídricos, é o uso de cultivares que apresentem maior eficiência do uso da água, em decorrência de seu menor ciclo biológico e com elevada produtividade de

grãos. Além disso, as cultivares podem apresentar comportamentos distintos quanto a emissão de GEE, pois apresentam alta plasticidade fenotípica, sendo que as condições ambientais, o crescimento das plantas e as características morfofisiológicas são diferenças que impactam nos padrões de emissão de GEE.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho agrônômico e as modificações morfofisiológicas de cultivares de arroz submetidas a manejos alternativos de irrigação, bem como sua influência sobre a produtividade da água de irrigação (Capítulo I); avaliar os componentes do rendimento e a qualidade de grãos de cultivares de arroz submetidas a manejos alternativos de irrigação (Capítulo II), bem como a influência de manejos alternativos de irrigação sobre as emissões de metano e de óxido nitroso, o potencial de aquecimento global parcial e a relação com a produtividade de grãos de cultivares de arroz irrigado (Capítulo III).

## **2 CAPÍTULO I (Artigo Científico)**

### **Práticas alternativas de manejo da irrigação: uso de água, produtividade e características morfofisiológicas de cultivares de arroz**

Resumo: O estudo objetivou avaliar manejos alternativos da irrigação no uso de água, produtividade de grãos e modificações morfofisiológicas de cultivares de arroz. Foram testados para o fator A métodos de irrigação por aspersão e superfície (contínua e intermitente). Para o fator D foram testadas as cultivares de arroz IRGA 424 RI e IRGA 431 CL, em um fatorial 3 x 2. Na segunda safra agrícola foi adicionado o tratamento escarificação do solo com irrigação por aspersão, em um fatorial 4 x 2. A irrigação intermitente proporciona redução do uso de água sem prejuízo a produtividade de grãos da cultura quando comparado à irrigação contínua. A irrigação por aspersão promove redução do uso de água, no entanto, com redução do acúmulo de matéria seca da parte aérea e de raiz, do acúmulo de nutrientes, dos parâmetros fisiológicos e da produtividade de grãos da cultura. A escarificação do solo proporciona maior acúmulo de matéria seca da parte aérea e de raiz, do acúmulo de nutrientes, dos parâmetros relacionados à fotossíntese e da produtividade de grãos de arroz quando irrigado por aspersão, resultando em maior produtividade de água de irrigação. Devido à redução do ciclo, a cultivar IRGA 431 CL proporciona redução do uso de água e maior produtividade da água de irrigação, sem prejuízo a produtividade de grãos da cultura quando comparada a cultivar IRGA 424 RI.

Palavras-chave: irrigação por aspersão, irrigação contínua, irrigação intermitente, escarificação, manejo do solo

### **Irrigation methods: water use, grain yield and morphophysiological characteristics of rice varieties**

Abstract: The study aimed to evaluate irrigation methods on water use, grain yield, and morphophysiological changes in rice varieties. Sprinkler and border irrigation methods (continuous and intermittent) were tested for factor A. For factor D, rice varieties IRGA 424

RI and IRGA 431 CL were tested, in a 3 x 2 factorial. In the second harvest season, a treatment with soil deep tillage in sprinkler irrigation was added, in a 4 x 2 factorial. Intermittent irrigation provides reduced water use without harming grain yield when compared to continuous irrigation. Sprinkler irrigation promotes a reduction in water use, however, with a reduction in shoot and root dry matter accumulation, nutrient accumulation, physiological parameters, and grain yield. Soil scarification provides a greater accumulation of shoot and root dry matter, nutrient accumulation, parameters related to photosynthesis, and rice grain yield when sprinkled, resulting in greater irrigation water productivity. Due its smaller cycle variety IRGA 431 CL provides reduced water use and higher irrigation water productivity, without harming the grain yield, when compared with the variety IRGA 424 RI.

Key words: sprinkler irrigation, continuous irrigation, intermittent irrigation, soil scarification, soil management

## INTRODUÇÃO

Cerca de 75% da produção global de arroz é cultivada em planícies irrigadas, onde os campos são geralmente inundados durante toda a estação de cultivo (IRRI, 2017). No estado do Rio Grande do Sul, o método de irrigação utilizado tradicionalmente é o de superfície por sistema de inundação contínua, no qual o arroz é semeado em condições de solo seco e inundado quando as plantas contêm de três a quatro folhas completamente desenvolvidas (V3/V4), de acordo com Counce et al. (2000). A lâmina de água é mantida até cerca de 20 dias antes da colheita, requerendo um volume de água para irrigação que pode variar entre 5.000 a 15.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (Massey et al., 2014; Avila et al., 2015; Carracelas et al., 2019), dependendo das condições edafoclimáticas de cultivo.

Embora o cultivo do arroz com alagamento do solo esteja associado a diversos benefícios à cultura, tais como o controle de plantas daninhas, o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo e isolamento/proteção térmica durante a microsporogênese (Yoshida, 1981), o mesmo está vinculado a uma série de implicações, incluindo o elevado uso da água e a baixa produtividade da água de irrigação (Avila et al., 2015; Carracelas et al., 2019). Nesse sentido, a busca por métodos de irrigação alternativos que sejam mais eficientes no uso da água e necessidade de mão de obra, e que, ao mesmo tempo, mantenham a produtividade de grãos da cultura, tem sido um desafio constante para a pesquisa e para o setor produtivo.

Um sistema de irrigação alternativo à irrigação contínua consiste em suprimir temporariamente o fornecimento de água à lavoura, permitindo a redução na altura da lâmina de água até atingir nível próximo ou igual ao do solo. Desta forma, solo é mantido saturado ou com uma pequena altura de lâmina de água sobre a superfície durante todo o ciclo da cultura. Esse método, denominado irrigação intermitente, pode ser utilizado ao longo de todo o ciclo de cultivo sem prejuízo a produtividade de grãos, resultando em economia do uso de água, que pode variar de 22 a 76% (Massey et al., 2014; Avila et al., 2015; Carracelas et al., 2019).

Outro método de irrigação com efeitos positivos sobre a economia do uso da água é o de irrigação por aspersão, como a irrigação por pivô central, no qual o arroz é cultivado durante todo o ciclo em solo oxidado, embora o teor de água no solo seja mantido o mais próximo possível da saturação (Pinto et al., 2020). Na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, Pinto et al. (2020) estimaram que o volume de água utilizado pela irrigação por aspersão foi de 5.500 m<sup>3</sup>/ha ao longo do ciclo da cultura do arroz, correspondendo a aproximadamente metade do volume tradicionalmente utilizado no sistema de produção por alagamento contínuo.

Apesar da economia substancial de água, a substituição da irrigação por inundação para aspersão traz mudanças ao ambiente e ao sistema de produção do arroz, o que exige adequações no manejo da cultura. Um aspecto importante é que na condição oxidada do solo não estão presentes modificações químicas e biológicas causadas pela inundação e que beneficiam a cultura do arroz, o que pode ter consequências sobre a produtividade de grãos (Pinto et al., 2020). Outro aspecto está relacionado às condições físicas naturalmente desfavoráveis desses solos, como a presença de camada compactada próxima a superfície (Sartori et al., 2016), as quais podem restringir o crescimento de raízes e limitar a disponibilidade de água às plantas. Dessa forma, práticas de manejo que possibilitem a melhoria dos atributos físicos do solo são importantes para o adequado desempenho agrônômico da cultura nesse sistema de cultivo. Alguns estudos apontam que a escarificação do solo tem proporcionado melhoria do ambiente radicular de plantas em rotação de culturas em terras baixas, como o rompimento da camada compactada, redução da densidade do solo, aumento da macroporosidade e da capacidade de infiltração de água no solo (Giacomeli et al., 2017; Fin et al., 2018), sendo uma alternativa para áreas cultivadas com arroz irrigado por aspersão com limitações físicas do solo.

Visando racionalizar o uso dos recursos hídricos, outra estratégia que pode ser utilizada associada aos métodos de irrigação é o uso de cultivares que apresentam maior eficiência do

uso da água, em decorrência de seu menor ciclo biológico e de sua elevada produtividade de grãos. Todavia, há uma grande variabilidade das respostas morfofisiológicas em cultivares quando submetidas às condições de menor disponibilidade hídrica do solo, as quais irão depender do período (estádio fenológico), duração e frequência em que a mesma ocorre (Streck et al., 2019). Em vista do exposto, esse trabalho teve por objetivo avaliar o uso de água, produtividade de grãos e modificações morfofisiológicas de cultivares de arroz sob práticas alternativas de manejo da irrigação.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido sob condições de campo durante as safras agrícolas de 2019/20 e 2020/21, em Santa Maria - RS, no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é Cfa, subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes, tendo precipitação pluvial média anual de 1.688 mm (Climate-data, 2021). O solo é classificado como Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (EMBRAPA, 2018), possuindo as seguintes características físico-químicas na camada de 0-0,2 m de profundidade: argila= 20%; MO= 2,1; pH em água (1:1)= 6,9; saturação de bases= 83,7; saturação por Al= 0,0%; P-Mehlich= 11,6 mg dm<sup>-3</sup>; K= 34,5 mg dm<sup>-3</sup>; S= 7,3 e CTC pH7= 14,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

A instalação do experimento foi realizada no delineamento de blocos ao acaso. Na safra 2019/20, o experimento foi composto por um fatorial 3 x 2, com quatro repetições. Os níveis do fator A foram compostos por métodos e sistemas de irrigação, sendo: irrigação contínua (o solo foi inundado no estágio V3 da cultura do arroz, mantendo-se uma lâmina de água de 0,1 m até o estágio R7, procedendo-se então a supressão da irrigação); irrigação intermitente: o solo foi inundado no estágio V3 da cultura do arroz, sendo mantida uma lâmina de água de 0,1 m até o estágio V6, quando a irrigação foi suprimida, sendo retomada quando o solo não apresentava lâmina de água livre sob a superfície, mas quando ainda estivesse saturado. Esse processo foi realizado até o estágio R7, quando foi procedida a supressão da irrigação; e irrigação por aspersão convencional: a partir do estágio V3 foram fornecidas lâminas de irrigação através do monitoramento do conteúdo volumétrico de água no solo, sendo realizada a supressão da irrigação no estágio R9 da cultura. Na safra 2020/21 foi inserido um tratamento, através da escarificação do solo e irrigação por aspersão convencional, compondo um fatorial 4 x 2, com quatro repetições. A escarificação foi realizada no mês de agosto de 2020, através de um escarificador da marca KLR modelo AS5AL, que atuou a uma profundidade média de 0,3 m.

Na irrigação por aspersão (2019/20), as irrigações foram engatilhadas quando a umidade volumétrica do solo atingia a capacidade de campo ( $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), aplicando-se lâminas líquidas fixas de 8 mm, com taxa de aplicação média de  $4 \text{ mm h}^{-1}$ . Na safra 2020/21, o critério para a irrigação foi alterado, sendo fornecido uma lâmina de irrigação diária líquida suficiente para elevar a umidade volumétrica de água no solo a porosidade total ( $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Para o monitoramento da umidade volumétrica do solo (Figura 1) foram instaladas sondas de capacitância, modelo CS-616 (Campbell Scientific, EUA), nas profundidades de 0-0,1 e 0-0,2 m, conectados a um Datalogger (modelo CR1000, Campbell Scientific, EUA).

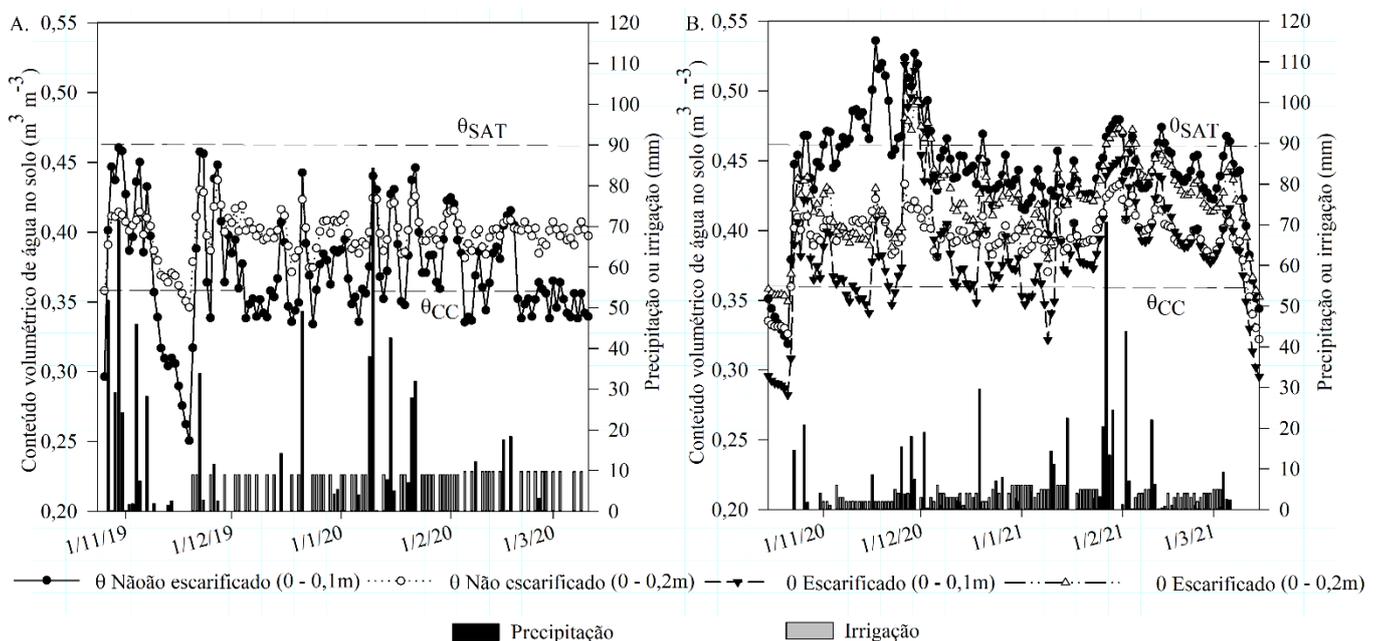


Figura 1. Conteúdo volumétrico de água no solo no método de irrigação por aspersão cultivado com arroz nas safras agrícolas 2019/20 (A) e 2020/21 (B).  $\theta_{SAT}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na saturação.  $\theta_{CC}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na capacidade de campo

Para as parcelas com irrigação por aspersão foram utilizados aspersores setoriais, com espaçamento de 8 m e linhas de 12 metros, com 50% de sobreposição, conferindo coeficiente de uniformidade de 85% (Christiansen, 1942).

O fator D foi composto por duas cultivares de arroz irrigado, usando uma cultivar de ciclo médio (IRGA 424 RI) e uma cultivar de ciclo precoce (IRGA 431 CL). As unidades experimentais dos métodos de irrigação por superfície pelos sistemas com fornecimento contínuo e intermitente foram compostas por  $45,9 \text{ m}^2$  ( $1,53 \times 30 \text{ m}$ ). Já as unidades experimentais do tratamento irrigação por aspersão foram compostas por  $360 \text{ m}^2$  ( $12 \times 30 \text{ m}$ ) na safra 2019/20 e por  $180 \text{ m}^2$  ( $6 \times 30 \text{ m}$ ) na safra 2020/21.

O local de realização do experimento durante a entressafra de 2019 foi mantido em pousio e, antes da semeadura, foram realizadas operações de gradagem e nivelamento do solo. A colheita do arroz da safra 2019/20 foi realizada no mês de março, em solo seco. No mês de maio foi realizada a aplicação de 3 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (PRNT 60%) em superfície. Após, realizou-se a semeadura a lanço de azevém e trevo persa nas quantidades de 40 kg ha<sup>-1</sup> e 8 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A dessecação das plantas de cobertura foi realizada no mês de agosto. No momento da dessecação, o acúmulo de matéria seca da parte aérea das plantas de cobertura era de 1.956 kg ha<sup>-1</sup>.

A semeadura do arroz foi realizada nos dias 24 e 14 de outubro de 2020 e 2021, respectivamente, na densidade de 100 kg de sementes ha<sup>-1</sup>, com espaçamento entrelinhas de 0,17 m. A adubação de base foi composta por 7 kg ha<sup>-1</sup> de N, 70 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 105 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na safra 2019/20 e por 20 kg ha<sup>-1</sup> de N, 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na safra 2020/21. A adubação de cobertura na safra 2019/20 foi composta por 90 kg de N ha<sup>-1</sup> em V3 e 30 kg de N ha<sup>-1</sup> em V6 e R0. Na safra 2020/21 foi composta por 90 kg de N ha<sup>-1</sup> em V3, 30 kg de N ha<sup>-1</sup> + 25 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> em V6 e 30 kg de N ha<sup>-1</sup> + 25 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> em R0. Os demais tratamentos culturais foram efetuados conforme as recomendações técnicas para a cultura (SOSBAI, 2018).

A matéria seca da parte aérea das plantas de arroz (MSPA) foi determinada através da coleta de uma amostra de 0,17 m<sup>2</sup> (0,17 x 1 m), nos estádios V6 e R4. Na mesma área foi inserido no solo um retângulo metálico de volume 0,012 m<sup>3</sup> (0,3 x 0,2 x 0,2 m) para coleta do monólito de solo e determinação da matéria seca de raiz (MSR). Após lavadas, as raízes e a parte aérea das plantas foram levadas à estufa de ventilação forçada a 65°C até atingirem massa constante. Posteriormente, foram pesadas em balança de precisão de 0,1 g e os dados obtidos transformados para kg ha<sup>-1</sup>.

A MSPA foi triturada em moinho Willey para a determinação dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) no tecido, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Com base nesses resultados e nos dados de MSPA, determinou-se as quantidades de N, P e K acumuladas na parte aérea das plantas de arroz.

Foram avaliadas a taxa de assimilação líquida de carbono, a condutância estomática, a concentração intercelular de CO<sub>2</sub> e a taxa transpiratória. As avaliações foram realizadas no terço médio da última folha completamente expandida das plantas de arroz no estágio fenológico R0, com a utilização do medidor portátil Infra Red Gas Analyzer (IRGA), marca WALZ, modelo GFS-3000, utilizando uma radiação fotossintética de 1500 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e concentração de CO<sub>2</sub> de 400 μmol mol<sup>-1</sup>.

Nos tratamentos irrigados por aspersão no experimento da safra 2020/21, foram coletadas amostras indeformadas de solo nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,15, 0,15-0,2 e 0,2-0,3 m de profundidade para determinação das propriedades físico-hídricas do solo: densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, além do conteúdo de água nos pontos da curva de retenção de água no solo de acordo com metodologia proposta por Donagema et al. (2011). A avaliação foi realizada no estádio R4 da cultura do arroz.

A produtividade de grãos foi determinada através da colheita de uma área útil de 4,08 m<sup>2</sup> (4 x 1,02 m), quando os grãos apresentavam umidade média de 22%. Após trilha, limpeza e pesagem dos grãos com casca, os dados foram corrigidos para 13% de umidade e convertidos para kg ha<sup>-1</sup>.

Para mensuração do volume de água utilizado nos métodos de irrigação contínua e intermitente, foram instalados hidrômetros de 1” de diâmetro para permitir o gerenciamento independente de cada unidade experimental. Para a irrigação por aspersão foi quantificada a lâmina bruta de água utilizada em cada irrigação. A produtividade da água de irrigação foi determinada através da relação entre a produtividade de grãos de arroz a 13% de umidade (kg ha<sup>-1</sup>) e o uso de água (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

Os resultados foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático. A análise da variância dos dados foi realizada através do teste F, e as médias dos fatores, quando significativas, foram submetidas ao teste de Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade de erro através do pacote estatístico SISVAR.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nas duas safras analisadas, o acúmulo de MSPA foi influenciado pelos métodos de irrigação e cultivares (Figura 2). As irrigações contínua e intermitente foram as que proporcionaram as maiores médias nos estádios V6 e R4, não diferindo estatisticamente entre si. Atribui-se esse resultado à intensidade da intermitência utilizada, pois a irrigação era retomada quando o solo não apresentava lâmina de água, mas ainda estava saturado.

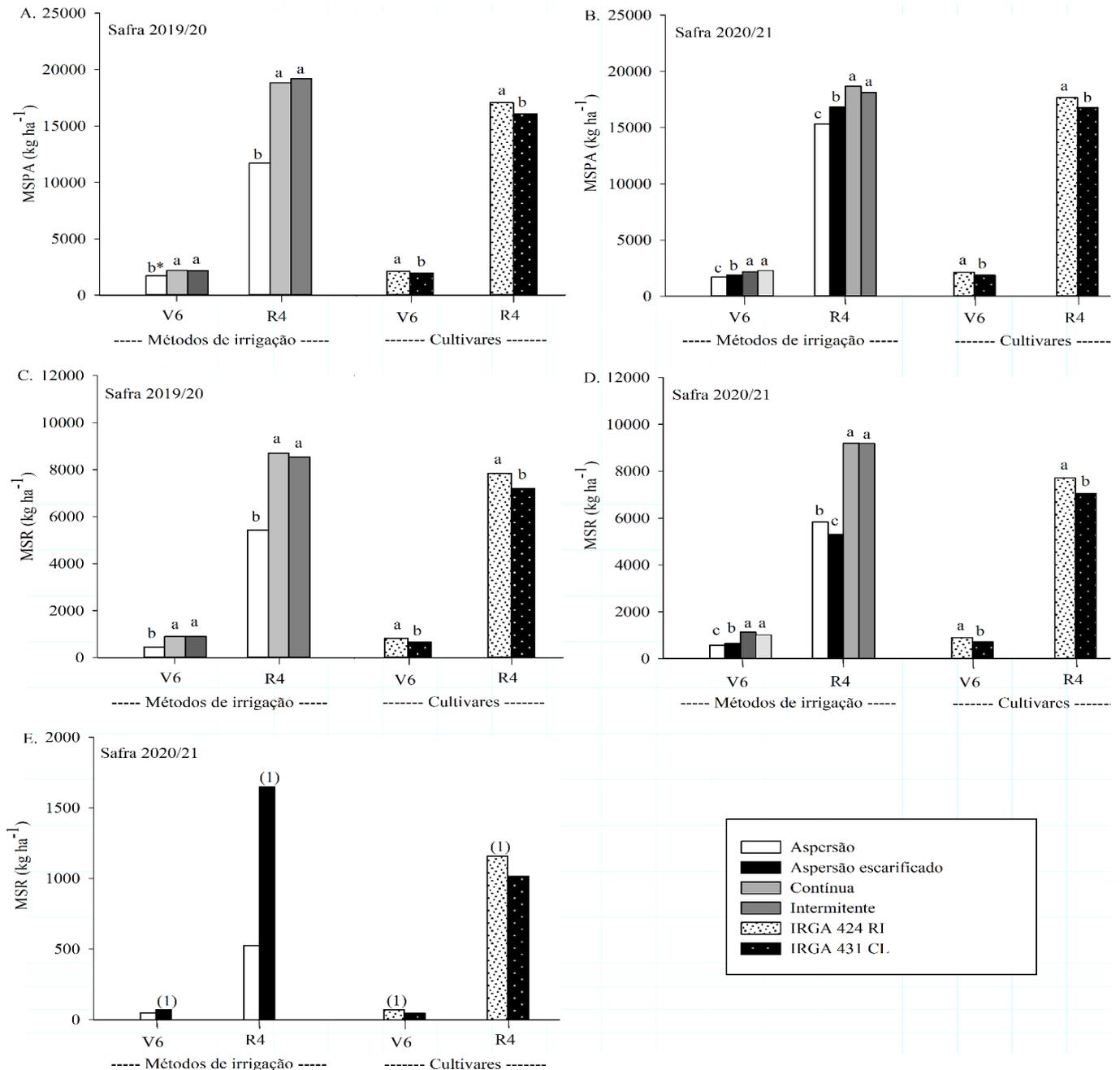


Figura 2. Matéria seca da parte aérea (A e B) e de raiz na camada de 0-0,1m (C e D) e na camada de 0,1-0,2m (E) nos estádios fenológicos V6 e R4 das cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos e sistemas de irrigação nas safras 2019/20 (A e C) e 2020/21 (B, D e E). \*Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott Knott em nível de 5% de probabilidade de erro. <sup>(1)</sup> Médias diferem entre si pelo teste F (p<0,05)

Por um lado, as alterações químicas no solo proporcionadas pelo alagamento, como o aumento do pH, da condutividade elétrica e consequente aumento da disponibilidade de nutrientes na solução do solo (Ponnamperuma, 1977), que beneficiam a cultura do arroz, possivelmente não tenham sido alteradas com a implementação da intermitência da irrigação, proporcionando condições de crescimento e desenvolvimento semelhantes ao obtido pela irrigação contínua. Do contrário, quando o cultivo do arroz foi realizado em solo oxidado

(como a aspersão) houve redução do acúmulo da MSPA, obtendo as menores médias nos estádios V6 e R0, em ambas as safras. Todavia, quando realizado o seu cultivo em solo escarificado, na safra 2021/21, verificou-se aumento do acúmulo de MSPA, no entanto, com valores ainda inferiores aos obtidos pelas irrigações contínua e intermitente. A redução do acúmulo de MSPA quando realizado o cultivo do arroz em solo oxidado pode estar relacionado, em parte, a ausência das alterações químicas promovidas pelo alagamento no solo, no qual, em condições oxidadas, há redução da disponibilidade de nutrientes na solução do solo.

Quando o solo é alagado, ocorrem alterações químicas e biológicas em relação ao ambiente oxidado. Nesta condição, após o consumo do oxigênio, os microrganismos anaeróbios passam a utilizar compostos inorgânicos oxidados como receptores de elétrons, principalmente o  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{4+}$  das superfícies dos óxidos, que são reduzidos a  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ , aumentando a sua concentração na solução do solo (Ponnamperuma, 1977). Embora o fósforo (P) não esteja diretamente envolvido nas reações de oxirredução, a sua disponibilidade na solução é aumentada por estar ligado quimicamente a substâncias oxidadas, tais como os óxidos de Fe e Mn (Ponnamperuma, 1977). O potássio (K) também não está diretamente envolvido nas reações de oxirredução, no entanto, tem sua disponibilidade aumentada devido ao seu deslocamento dos sítios de troca para a solução do solo pelos cátions  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ , e à liberação de K das frações não trocável e estrutural do solo (Ponnamperuma, 1977).

Em relação ao nitrogênio (N), em condições aeróbicas, o  $\text{NH}_4^+$  oriundo da mineralização da matéria orgânica ou da aplicação de fertilizantes amoniacais (ureia) é nitrificado ( $\text{NO}_3^-$ ). No entanto, por ser muito móvel no solo, pode ocorrer a perda de  $\text{NO}_3^-$  por lixiviação, por não formar ligações fortes o suficiente com as cargas permanentes do solo para retê-lo nas camadas de exploração radicular (Buresh et al., 2008). Além disso, o  $\text{NO}_3^-$  pode ser perdido por desnitrificação, se houver períodos de excesso de umidade do solo (Buresh et al., 2008). Já no ambiente alagado, a ausência de oxigênio interrompe o processo de nitrificação, favorecendo a absorção e o acúmulo desse nutriente pelas plantas, condição favorecida nas irrigações contínua e intermitente.

Como resultado, houve redução do acúmulo de N, P e K na parte aérea das plantas de arroz cultivadas pela irrigação por aspersão, sendo as irrigações contínua e intermitente as que apresentaram as maiores médias em ambas as safras, não diferindo estatisticamente entre si (Figura 3).

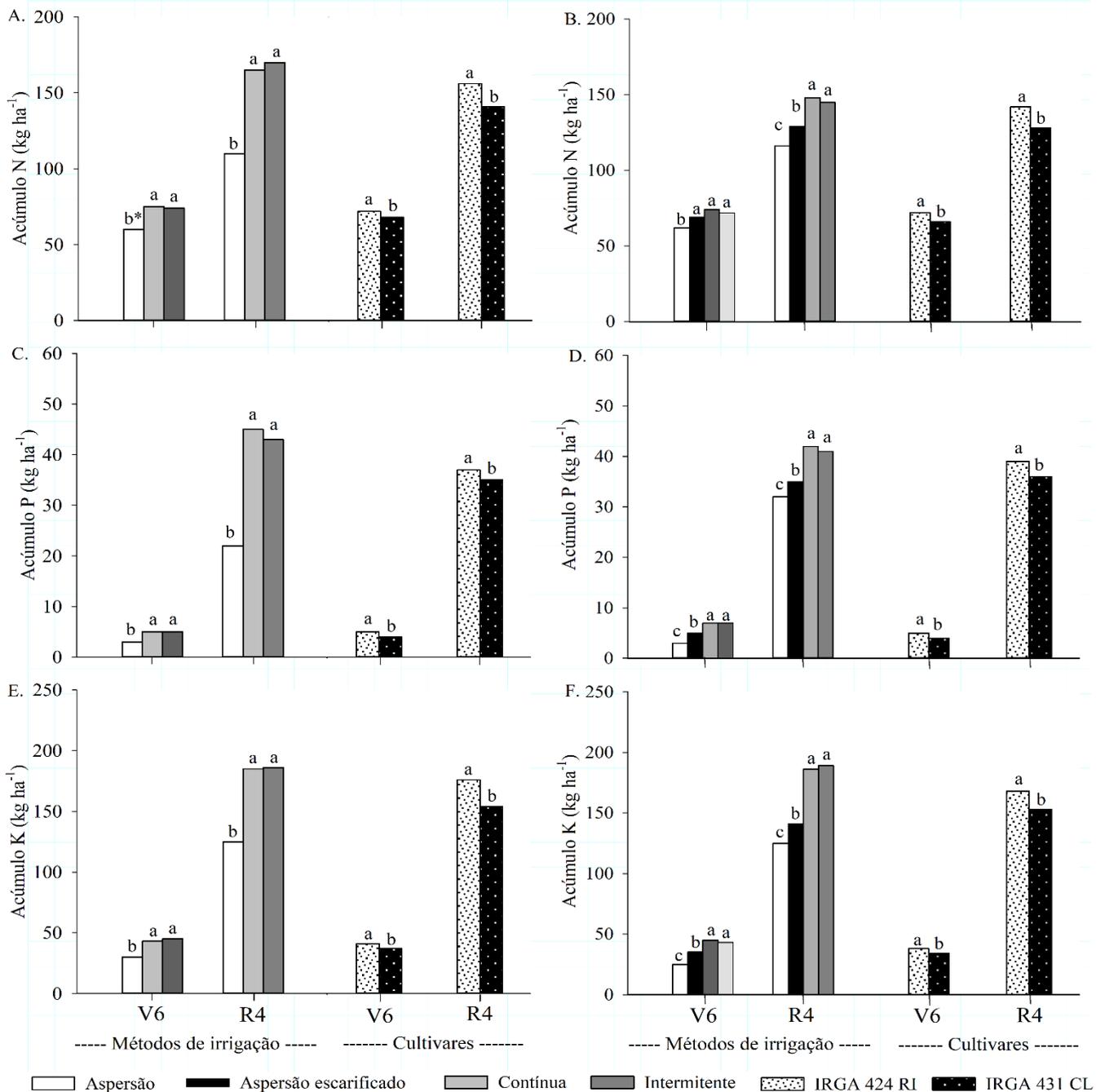


Figura 3. Acúmulo de N (A e B), P (C e D) e K (E e F) na parte aérea das plantas de arroz irrigado nos estádios fenológicos V6 e R4 das cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos e sistemas de irrigação nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2020/21 (B, D e F). Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott Knott em nível de 5% de probabilidade de erro

A escarificação do solo irrigado por aspersão (2020/21) resultou em acréscimos no acúmulo de nutrientes na parte aérea. Isso está relacionado, em parte, a atenuação dos impedimentos físicos do solo proporcionados pela escarificação (Figura 4), a qual promoveu maior distribuição e volume de raízes em profundidade no perfil de solo (Figura 1).

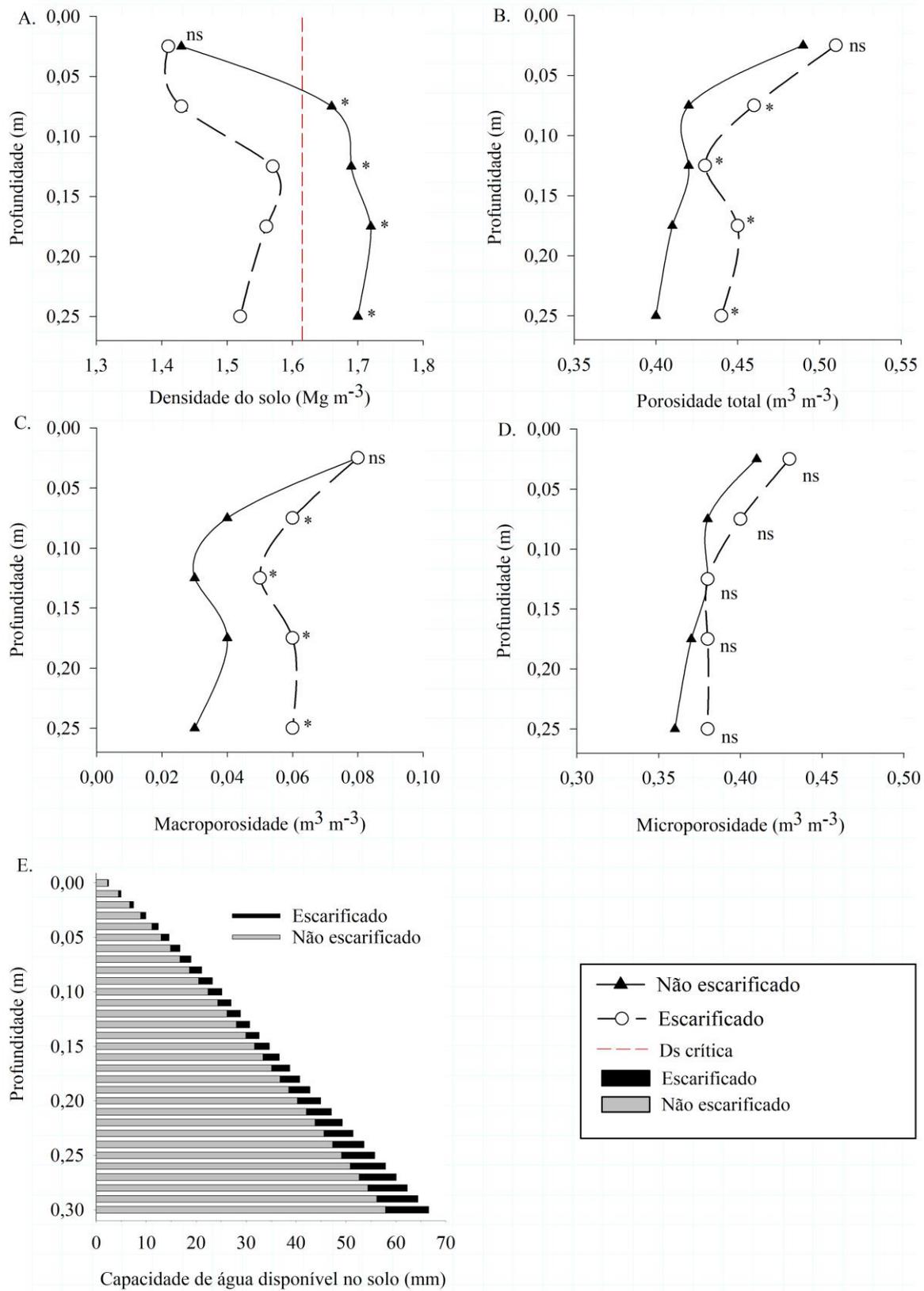


Figura 4. Densidade (A), porosidade total (B), macroporosidade (C), microporosidade (D) e capacidade de água disponível no solo (E) nas camadas de 0,0–0,5, 0,05–0,1, 0,1–0,15, 0,15–0,2 e 0,2–0,3 no método de irrigação por aspersão em solo escarificado e não escarificado. \* Médias diferem entre si pelo teste F ( $p < 0,05$ ). ns Não significativo pelo teste F ( $p < 0,05$ ). Ds = densidade do solo.

Isso fica evidente quando analisado o acúmulo de MSR nas camadas estratificadas do solo, onde o sistema radicular das plantas irrigadas por aspersão ficou restrito a camada de 0,0 – 0,1 m, devido à presença de uma camada com elevado grau de compactação na camada de 0,05 – 0,10 m de profundidade, a qual apresentou valor de densidade de  $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$ , sendo superior a densidade crítica considerada limitante ao crescimento de raízes para esse tipo de solo (Reichert et al., 2009).

Quando realizada a escarificação do solo, a MSR foi 8,6% superior em comparação àquela verificada no tratamento sem escarificação, contudo, 24% do sistema radicular estava distribuído na camada de 0,1 – 0,2 m, enquanto que, no tratamento sem escarificação, esse valor foi de apenas 8%. Isso demonstra que, além de proporcionar maior produção de MSR, a escarificação do solo possibilitou maior distribuição de raízes ao longo do perfil, promovendo maior acesso aos nutrientes localizados em camadas subsuperficiais do solo. Maiores valores de acúmulo de MSR foram verificados em ambiente alagado pelas irrigações contínua e intermitente, as quais não difeririam estatisticamente entre si. Em relação as cultivares, a IRGA 424 foi a que apresentou maior acúmulo de MSR e de nutrientes no tecido da parte aérea, diferindo estatisticamente da cultivar IRGA 431 CL em ambas as safras.

O maior crescimento de raízes em profundidade teve reflexos no aumento da capacidade de água disponível às plantas irrigadas por aspersão em solo escarificado, quando comparado a irrigação por aspersão em solo não escarificado (Figura 4). Se considerado apenas o crescimento de raízes até 0,2 m, o conteúdo de água disponível foi de 49 mm, enquanto que no tratamento sem escarificação e com limitação física aos 0,1 m, esse valor foi de 22 mm, ou seja, uma redução de 55%. Nesse sentido, o reduzido acesso à água em função do menor volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas, associado a períodos de elevada demanda evapotranspirativa (superior a  $7 \text{ mm dia}^{-1}$ ) no início do mês de janeiro de 2020 (Figura 5A) e ao final do mês de dezembro de 2020 (Figura 5B), impactaram negativamente os parâmetros fisiológicos do tratamento com irrigação por aspersão não escarificado, promovendo redução das variáveis morfofisiológicas. Nesse sentido, houve redução de 44 e 13% da condutância estomática, 96 e 32% da taxa de transpiração, 5 e 3% da concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  e de 27 e 14% da taxa de assimilação líquida de  $\text{CO}_2$  das plantas do tratamento com irrigação por aspersão não escarificado quando comparado as irrigações contínua e intermitente, as quais apresentaram as maiores médias, não diferindo entre si nas safras 2019/20 e 2010/21, respectivamente (Figura 6).

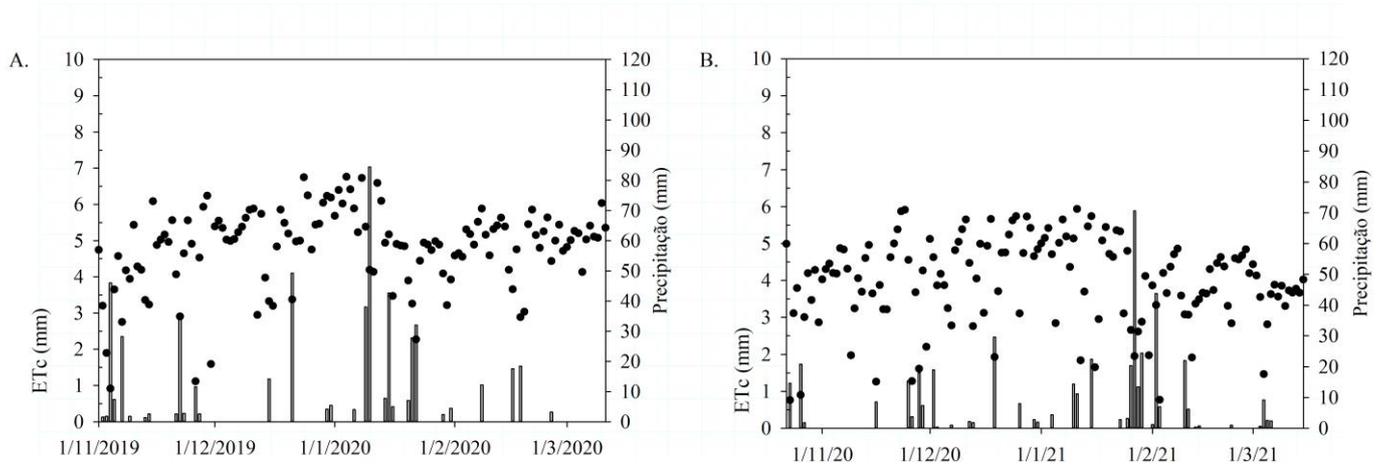


Figura 5. Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência (ET<sub>c</sub>) nas safras 2019/20 (A) e 2020/21 (B)

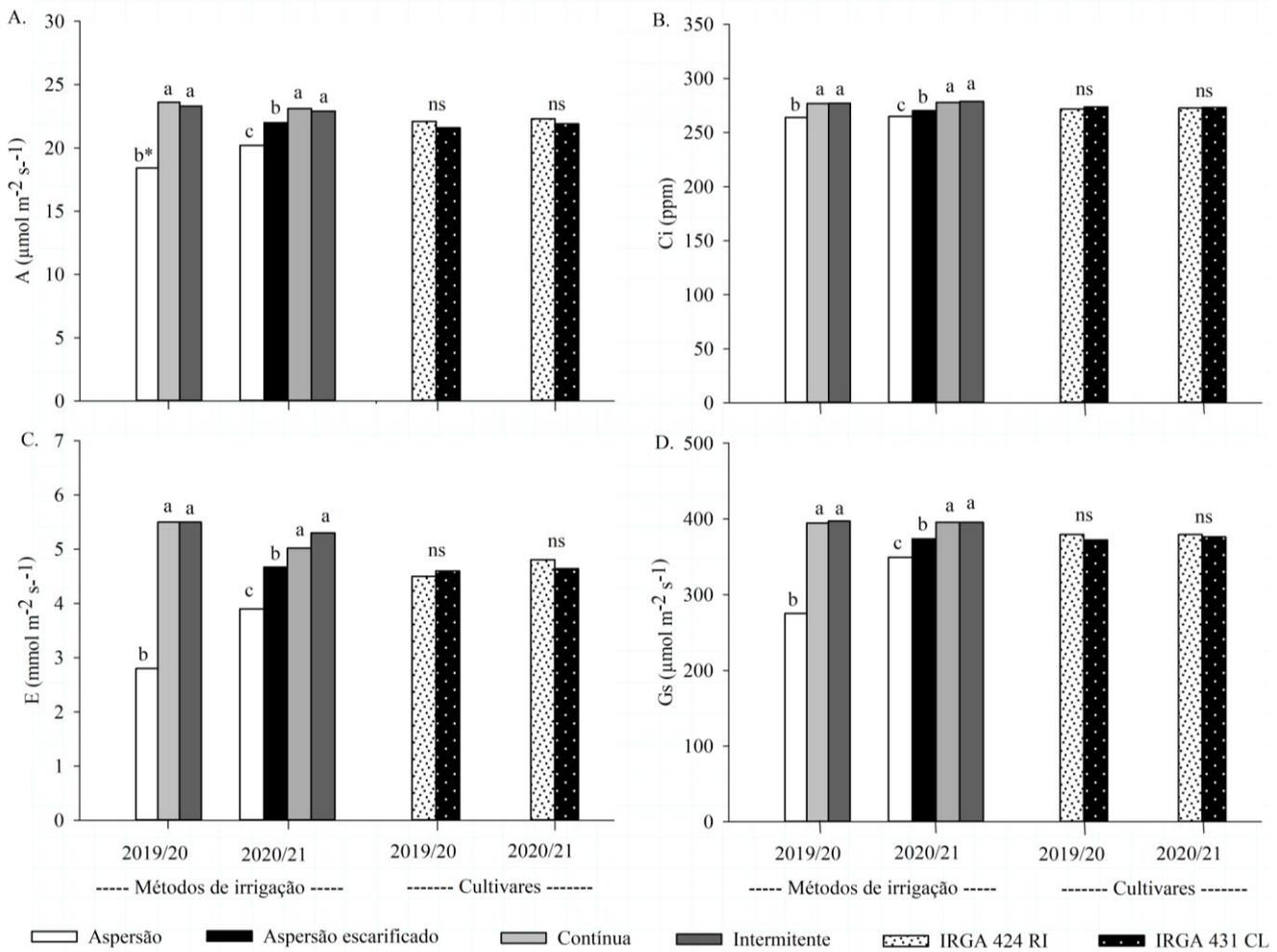


Figura 6. Taxa de assimilação líquida de carbono (A), concentração intracelular de CO<sub>2</sub> (B), taxa de transpiração (C) e condutância estomática (D) de plantas de arroz irrigado no estágio R0 das cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431 CL, em função de métodos e sistemas de irrigação nas safras 2019/20 e 2020/21. Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade de erro. <sup>ns</sup> Não significativo pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ )

A redução na disponibilidade de água no solo, quando se utilizou a aspersão em solo não escarificado, resultou em menores taxas de transpiração, possivelmente devido a um controle estomático exercido pelas plantas em resposta à redução na água disponível no solo, acarretando, também, uma redução do valor de condutância estomática. Com o estômato mais fechado, a difusão do CO<sub>2</sub> para o interior dos cloroplastos é menor, limitando a eficiência da carboxilação da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase oxigenase, reduzindo assim os valores de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> durante o processo de fotossíntese (Taiz et al., 2017).

Verifica-se uma melhora dos parâmetros fotossintéticos das plantas irrigadas por aspersão em solo não escarificado na safra 2020/21, o que pode estar relacionado, em parte, a maior disponibilidade de água no solo desse tratamento, a qual foi mantida próximo a saturação, diferente da safra 2019/20 em que as irrigações eram realizadas quando o conteúdo de água no solo atingisse a capacidade de campo. Em relação as irrigações com aspersão na safra 2020/21, verifica-se uma melhora dos parâmetros fotossintéticos no tratamento com escarificação do solo, o que pode estar relacionado ao aumento disponibilidade de água, reduzindo os efeitos nocivos às plantas causados por períodos de elevada demanda evapotranspirativa.

Quando a disponibilidade de água às plantas não foi limitante foram verificados os maiores valores de taxa fotossintética, concentração intercelular de CO<sub>2</sub>, taxa de transpiração e condutância estomática pelas irrigações contínua e intermitente, as quais não diferiram estatisticamente entre si. Não se verificou diferença estatística entre as cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431 CL para as variáveis taxa fotossintética, concentração intercelular de CO<sub>2</sub>, taxa de transpiração e condutância estomática, em ambas as safras.

As limitações impostas pelo sistema de cultivo do arroz irrigado por aspersão, como a restrição física ao crescimento de raízes e conseqüente menor disponibilidade de água as plantas, o menor acúmulo de nutrientes e a alteração das características morfofisiológicas da planta promoveram redução significativa da produtividade de grãos da cultura, obtendo médias de 9.094 e 10.547 kg ha<sup>-1</sup> nas safras agrícolas 2019/20 e 2020/20, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Produtividade de grãos, produtividade da água e volume de água utilizado para irrigação das cultivares de arroz irrigado IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos e sistemas de irrigação nas safras 2019/20 e 2020/21

Métodos de irrigação	----- Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> ) -----		----- Produtividade da água (kg m <sup>-3</sup> ) -----	
	Safra 2019/20	Safra 2020/21	Safra 2019/20	Safra 2020/21
Aspersão	9.094 b*	10.547 c	1,8 b*	2,5 b
Aspersão escarificado	-	11.255 b	-	2,7 a
Contínua	12.337 a	12.039 a	1,5 c	1,5 d
Intermitente	12.440 a	11.844 a	1,9 a	1,9 c
<b>Cultivares</b>				
IRGA 424 RI	11.180 <sup>ns</sup>	11.334 <sup>ns</sup>	1,6 b	2,1 b
IRGA 431 CL	11.401	11.163	1,9 a	2,2 a
CV%	2,3	4,1	2,9	3,4
----- 2019/20 -----				
Métodos de irrigação	Cultivares		Média	CV%
	IRGA 424 RI	IRGA 431 CL		
----- Volume de água para irrigação (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) -----				
Aspersão	5.178 cA <sup>1</sup>	4.690 cB	4.934	
Contínua	8.670 aA	7.810 aB	8.240	1,1
Intermitente	6.868 bA	6.182 bB	6.525	
Média	6.905	6.227		
----- 2020/21 -----				
Métodos de irrigação	Cultivares		Média	CV%
	IRGA 424 RI	IRGA 431 CL		
----- Volume de água para irrigação (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) -----				
Aspersão	4.264 cA	4.004 cB	4.134	
Contínua	8.287 aA	7.451 aB	7.869	1,7
Intermitente	5.982 bA	5.427 bB	5.704	
Média	6.178	5.627		

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott em nível de 5% de probabilidade de erro. <sup>ns</sup> Não significativo pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). <sup>1</sup> Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott em nível de 5% de probabilidade de erro.

Todavia, ao realizar a escarificação do solo, e assim promover melhorias ao ambiente de desenvolvimento radicular das plantas, obteve-se incremento dos parâmetros morfofisiológicos da cultura, resultando em um acréscimo de 6,3% produtividade de grãos, em relação a aspersão sem escarificação. Quando os impedimentos físicos e químicos do solo não foram limitantes do cultivo do arroz, devido aos efeitos benéficos proporcionados do alagamento nas irrigações contínua e intermitente, foram verificadas as maiores produtividades de grãos do experimento, com valores de 12.337 kg ha<sup>-1</sup> e 12.440 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e de 12.039 kg ha<sup>-1</sup> e 11.844 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21, respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. Embora a cultivar IRGA 431 CL tenha apresentado redução das variáveis morfofisiológicas analisadas e acúmulo de nutrientes na parte aérea,

isso não se refletiu sobre a produtividade de grãos da cultura, não diferindo estatisticamente da cultivar IRGA 424 RI, as quais obtiveram médias de 11.180 kg ha<sup>-1</sup> e 11.401 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e 11.334 kg ha<sup>-1</sup> e 11.163 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21, respectivamente.

Em relação aos parâmetros relacionados a irrigação, houve interação entre os fatores para o uso de água, obtendo-se diferença estatística para os métodos de irrigação e cultivares (Tabela 1). A irrigação contínua proporcionou o maior uso de água para irrigação, com média de 8.240 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 7.869 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. A irrigação intermitente apresentou redução de 21 e 28% do uso de água, com médias de 6.525 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 5.704 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. A irrigação por aspersão foi a que apresentou a maior redução do uso da água, apresentando médias de 5.704 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 4.134 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, correspondendo a redução de 40 e 47% nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente.

O menor uso de água pelos tratamentos com irrigação por aspersão e intermitente é resultado do maior aproveitamento da água das chuvas durante o período de cultivo, que nas safras 2019/20 e 2020/21 foram de 7.016 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 4.424 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Embora o volume de chuvas na safra 2020/21 tenha sido menor, foram eventos de menor intensidade, no entanto, melhor distribuídos ao longo do período de cultivo, permitindo o seu melhor aproveitamento. Já na safra 2019/20, a distribuição de chuvas foi irregular, com destaque para os meses de dezembro de 2019 e fevereiro de 2020, com precipitação acumulada de 813 e 880 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, uma redução de 53 e 63% do volume de chuva em relação a normal climatológica para esses períodos, respectivamente. Assim, em anos com chuvas de maior volume e distribuição mais uniformes ao longo do período de cultivo, os tratamentos com irrigação por aspersão e intermitente poderão ter a economia do uso de água potencializada.

A maior eficiência do uso da água está atrelada a uma maior produtividade da água de irrigação, que é maior em métodos que mantêm a produtividade de grãos com menor uso de água (Hassen et al., 2017). Diante disso, devido à redução da produtividade de grãos proporcionada pelo método de irrigação por aspersão na safra 2019/20, a maior produtividade da água foi obtida pela irrigação intermitente, com valor de 1,9 kg m<sup>-3</sup>, seguido pela irrigação por aspersão (1,8 kg m<sup>-3</sup>) e contínua (1,5 kg m<sup>-3</sup>) (Tabela 1). Na safra 2020/21, o aumento da produtividade de grãos proporcionado pela escarificação do solo associada a irrigação por aspersão resultou na obtenção do maior valor de produtividade da água de irrigação, com média de 2,7 kg m<sup>-3</sup>, seguido da irrigação por aspersão (2,5 kg m<sup>-3</sup>), da irrigação intermitente (1,9 kg m<sup>-3</sup>) e pela irrigação contínua, a qual obteve o menor valor de produtividade da água de irrigação (1,5 kg m<sup>-3</sup>). Entre as cultivares, a IRGA 431 CL obteve acréscimo de 16% sobre

a produtividade da água de irrigação em relação a IRGA 424 RI na safra 2019/20 e de 5% na safra 2020/21. Nesse sentido, a IRGA 431 CL proporcionou menor uso de água para irrigação pela redução do ciclo, proporcionando produtividade de grãos equivalente ao obtido pela IRGA 424 RI, sendo uma estratégia de manejo viável quando se visa reduzir o uso de água.

De forma geral, pode-se observar que as limitações químicas e físicas do solo, associados à depleção do conteúdo volumétrico de água do solo até a capacidade de campo prejudicaram o desenvolvimento de plantas de arroz irrigadas por aspersão. No entanto, a escarificação possibilitou maior crescimento de raízes em profundidade, aumentando a disponibilidade de água e reduzindo os efeitos nocivos às plantas causados por períodos de elevada demanda evapotranspirativa. Resultado disso foi o incremento sobre os parâmetros morfofisiológicos e da produtividade de grãos de plantas irrigadas por aspersão quando comparado ao seu cultivo em solo não escarificado. Acréscimos sobre os parâmetros morfofisiológicos foram verificados em plantas de arroz irrigadas por aspersão quando a umidade volumétrica do solo foi mantida próximo à saturação, indicando que irrigações diárias são necessárias para promover a reposição do volume de água no solo para a obtenção de elevados tetos produtivos. Todavia, os maiores valores de acúmulo de matéria seca e de nutrientes na parte aérea, dos parâmetros fisiológicos analisados e da produtividade de grãos da cultura foram obtidos quando realizado o seu cultivo pelas irrigações contínua e intermitente.

Cabe ressaltar também que cultivo do arroz irrigado por aspersão promoveu a redução de 44% do uso de água com redução de 7% da produtividade de grãos quando realizado o seu cultivo em solo escarificado quando comparado ao cultivo inundado. Todavia, em casos em que há limitação de água, no entanto, não há recursos ou aptidão das características edafoclimáticas ao cultivo do arroz por aspersão, a irrigação intermitente torna-se uma alternativa, a qual proporcionou redução de 25% do uso de água sem prejuízo a produtividade de grãos da cultura. No entanto, destaca-se a importância do total domínio sobre o sistema de irrigação (conjunto motobomba e canais de irrigação), os quais devem estar dimensionados para proporcionar uma rápida retomada da irrigação após realizar a sua supressão, além da topografia do terreno, que pode ser limitante à adoção desta prática. Além disso, como fator primordial a adoção da intermitência da irrigação é necessário que a área contenha um bom nivelamento do solo, de forma a possibilitar uma lâmina de água uniforme na lavoura em todas as regiões do talhão, pois, se mal manejado, pode proporcionar a infestação de plantas daninhas na área devido a reoxigenação do solo, além de promover prejuízos à cultura pela restrição hídrica.

Por outro lado, em casos em que a disponibilidade de água não é um fator limitante ao cultivo do arroz, ou onde há a possibilidade de irrigação por gravidade (redução do custo de irrigação), o método de irrigação contínua torna-se uma boa opção, visto que o controle de plantas daninhas, o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo e regulação térmica durante a períodos críticos da cultura são maximizados. No entanto, ressalta-se a necessidade do elevado uso de água desse método de irrigação, no qual em anos com baixa incidência de chuvas pode ser o seu consumo de água potencializado.

Portanto, além da aptidão das áreas e da cultura para a utilização de um ou outro método e sistema de irrigação, o nível tecnológico e os recursos humanos que fazem a gestão da propriedade serão os fatores que farão a diferença para o êxito da escolha.

## **CONCLUSÕES**

A irrigação intermitente proporciona redução do uso de água sem prejuízo a produtividade de grãos da cultura quando comparado à irrigação contínua.

A irrigação por aspersão promove redução do uso de água, no entanto, com redução do acúmulo de matéria seca da parte aérea e de raiz, do acúmulo de nutrientes, dos parâmetros fisiológicos e da produtividade de grãos da cultura.

A escarificação do solo proporciona maior acúmulo de matéria seca da parte aérea e de raiz, do acúmulo de nutrientes, dos parâmetros relacionados à fotossíntese e da produtividade de grãos de arroz quando irrigado por aspersão, resultando em maior produtividade de água de irrigação.

A cultivar IRGA 431 CL proporciona redução do uso de água e maior produtividade da água de irrigação, sem prejuízo a produtividade de grãos da cultura, quando comparado ao IRGA 424 RI.

## **LITERATURA CITADA**

Avila, L. A. Martini, L. F. D.; Mezzomo, R. F.; Refatti, J. P.; Campos, R.; Cezimbra, D. M.; Machado, S. L. O; Massey, J. H.; Carlesso, R.; Marchesan, E. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation. *Agronomy Journal*, v. 107, n. 2, p. 442-448, 2015. <<https://doi.org/10.2134/agronj14.0080>>.

Buresh, R. J.; Reddy, K. R.; Kessel, C. V. Nitrogen transformations in submerged soils. In: Schepers, J. S.; Raun, W. R. Nitrogen in agricultural systems. v. 49, p. 401-436, 2008. <<https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c11>>.

- Carracelas, G. Hornbuckle, J.; Rosas, J.; Roel, A. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. *Agricultural water management*, v. 222, p. 161-172, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.049>> .
- Climate-data. Clima Santa Maria, RS. <<https://en.climate-data.org/south-america/brazil/rio-grande-do-sul/santa-maria-4498/>>. 17 Fev. 2021.
- Counce, Paul A.; Keisling, Terry C.; Mitchell, Andrew J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Science*, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000. <<https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>>.
- Donagema, G. K.; Campos, D. V. B. de; Calderano, S. B.; Teixeira, W. G.; Viana, J. H. M. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.
- Fin, S. S.; Marchesan, E.; Gubiani, P. I.; Farenzena, J. A. P.; Munari, M. S.; Coelho, L. L.; Cargnelutti, A.; Aramburu, B. B. Duration of the effects of scarification and raised bed associated with vegetation cover on soybean yield on an Alfisol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.53, n.11, p.1230-1238, 2018. <<https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018001100005>>.
- Giacomeli, R., Marchesan, E., Oliveira, M. L. D., Martin, T. N., Teló, G. M., Donato, G., Silva, M. F. D. Physical properties and crop management for corn in an Albaqualf. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 41, 2017. <<https://doi.org/10.1590/18069657rbcsc20160237>>.
- Hassen, M. B.; Monaco, F.; Facchi, A.; Romani, M.; Valè, G.; Sali, G. Economic performance of traditional and modern rice varieties under different water management systems. *Sustainability*, v. 9, n. 3, p. 347, 2017. <<https://doi.org/10.3390/su9030347>>.
- IRRI - International Rice Research Institute. Rice Knowledge Bank 2017. <<https://www.irri.org/rice-knowledge-bank>>. 16 Out. 2020.
- Massey, J. H.; Walker, T. W.; Anders, M. M.; Smith, M. C.; Avila, L. A. Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice irrigation in Mississippi. *Agricultural Water Management*, v. 146, p. 297–304, 2014. <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.023>>.
- Pinto, M. A. B.; Parfitt, J. M. B.; Timm, L. C.; Faria, L. C.; Concenço, G.; Stumpf, L.; Nörenberg, B. G. Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as a function of water availability in different phenological phases. *Field Crops Research*, v. 248, 2020. <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107714>>.
- Ponnamperuma, F. N. Physiological properties of submerged soil in relation to fertility. IRRI research paper series, v. 5, p. 1-29, 1977.
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., Hakansson, I. Reference bulk

density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009. <<https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>>.

Sartori, G. M. S.; Marchesan, E.; David, R. D.; Nicoloso, F. T.; Schorr, M. R. W.; Donato, G. Growth and development of soybean roots according to planting management systems and irrigation in lowland areas. *Ciência Rural*, v.46, n.9, p.1572-1578, 2016. <<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151579>>.

Scivittaro, W. B.; Gonçalves, D. R. N.; Vale, M. L. C. D.; Ricordi, V. G. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. *Ciência Rural*, v. 40, n. 6, p. 1283-1289, 2010. <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782010000600007>>.

SOSBAI. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. XXXII Reunião Técnica Da Cultura Do Arroz Irrigado. Farroupilha, RS: 2018. 209 p.

Streck, E. A.; Aguiar, G. A.; Facchinello, P. H. K.; de Magalhães J. A. M.; Krüger, T. K.; Parfitt, J. M. B. Desempenho agrônômico de cultivares de arroz sob sistema de irrigação por aspersão e inundação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 14, n. 3, p. 1-7, 2019. <<https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a5661>>.

Taiz, L.; Zeiger, E.; Muller, I. M.; Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. Tedesco, M. J.; Gianello, C.; Bissani, C. A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S. J. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

Thakur, A. K.; Mandal, K. G.; Mohanty, R. K.; Ambast, S. K. Rice root growth, photosynthesis, yield and water productivity improvements through modifying cultivation practices and water management. *Agricultural Water Management*, v. 206, p. 67–77, 2018. <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.027>>.

Yoshida, S. *Fundamentals of Rice Crop Science*. The Philippines, International Rice Research Institute (IRRI). 1981, 269 p.

1 **3 CAPÍTULO II (Artigo Científico)**

2

3 **Componentes do rendimento e qualidade de grãos de cultivares de arroz sob**

4 **métodos e sistemas de irrigação**

5 **Yield components and grain quality of rice cultivars under irrigation methods and**

6 **systems**

7

8 **Bruno Behenck Aramburu<sup>1\*</sup>**

9

10 **RESUMO**

11 O objetivo do trabalho foi avaliar os componentes do rendimento e a qualidade de grãos de  
12 cultivares de arroz submetidas a métodos e sistemas de irrigação. O experimento foi  
13 conduzido à campo, nas safras agrícolas de 2019/20 e 2020/21. Foram testados para o fator A  
14 métodos de irrigação por aspersão e superfície (contínua e intermitente). Para o fator D, foram  
15 testadas as cultivares de arroz IRGA 424 RI e IRGA 431 CL, em um fatorial 3x2. Na segunda  
16 safra agrícola, foi adicionado o tratamento escarificação do solo com irrigação por aspersão,  
17 em um fatorial 4x2. A irrigação por aspersão reduz o número de grãos por panícula e a  
18 produtividade de grãos, proporciona maior percentual de grãos opacos e gessados e reduz o  
19 rendimento de grãos inteiros de arroz. A escarificação do solo proporciona aumento do  
20 número de grãos por panícula e da produtividade de grãos, reduz o percentual de grãos opacos  
21 e gessados e promove maior rendimento de grãos inteiros de arroz quando irrigado por  
22 aspersão. A irrigação intermitente não reduz a produtividade e a qualidade de grãos de arroz  
23 quando comparada à irrigação contínua. A cultivar IRGA 431 CL contém menor percentual  
24 de grãos opacos e gessados e maior rendimento de grãos inteiros quando comparado à cultivar  
25 IRGA 424 RI.

26 **Palavras-chave:** *Oryza sativa* L., irrigação por aspersão, irrigação contínua, irrigação  
27 intermitente, rendimento de grãos inteiros.

28

## 29 **ABSTRACT**

30 The objective of this work was to evaluate the yield components and grain quality of rice  
31 cultivars subjected to irrigation methods and systems. The experiment was conducted in the  
32 field, in the agricultural crops of 2019/20 and 2020/21. Sprinkler and surface irrigation  
33 methods (continuous and intermittent) were tested for factor A. For factor D, the rice cultivars  
34 IRGA 424 RI and IRGA 431 CL were tested, in a 3x2 factorial. In the second harvest season,  
35 a treatment with soil deep tillage in sprinkler irrigation was added, in a 4 x 2 factorial.  
36 Sprinkler irrigation reduces the number of grains per panicle and grain yield, increases the  
37 percentage of opaque and plastered grains and reduces the yield of whole rice grains. Soil  
38 scarification provides an increase in the number of grains per panicle and in grain yield,  
39 reduces the percentage of opaque and plastered grains, and promotes greater whole grain yield  
40 of sprinkled rice. There is no significant difference in productivity between continuous and  
41 intermittent irrigation systems, and there is no damage to grain quality. The IRGA 431 CL  
42 cultivar contains a lower percentage of opaque and plastered grains and higher whole grain  
43 yield when compared to the IRGA 424 RI cultivar.

44 **Key words:** *Oryza sativa* L., sprinkler irrigation, continuous irrigation, intermittent irrigation,  
45 whole grain yield.

46

## 47 **INTRODUÇÃO**

48 No Brasil, a maior parcela da produção de arroz do país é proveniente do ambiente  
49 de terras baixas, onde a orizicultura irrigada é responsável por 70% da produção nacional, a  
50 qual é de aproximadamente 11,6 milhões de toneladas (CONAB, 2021). O método de

51 irrigação utilizado tradicionalmente é o de superfície, com fornecimento contínuo de água à  
52 cultura, o qual tem como principal característica a manutenção de uma lâmina de água de 0,05  
53 a 0,1 m sobre a superfície do solo durante um período de aproximadamente 80 a 100 dias  
54 (SOSBAI, 2018). Apesar de promover benefícios à cultura, como o controle de plantas  
55 daninhas e o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo, o mesmo está vinculado a uma  
56 série de limitações, incluindo o elevado uso da água e a baixa produtividade da água de  
57 irrigação (MASSEY et al., 2014; AVILA et al., 2015; CARRACELAS et al., 2019).

58         Dentre as alternativas adotadas para a redução do uso de água está o uso do método  
59 de irrigação por superfície com fornecimento intermitente de água à cultura, o qual consiste  
60 em suprimir temporariamente o fornecimento de água, permitindo a redução da altura da  
61 lâmina de irrigação até atingir nível próximo ou igual ao do solo. Desta forma, o solo  
62 permanece com presença de lâmina de água ou saturado durante o ciclo da cultura, conferindo  
63 economia do uso de água que pode variar de 22 a 76% (AVILA et al., 2015; CARRACELAS  
64 et al., 2019), e em alguns casos, sem prejuízo à produtividade e à qualidade de grãos de arroz  
65 (MASSEY et al., 2014; SONG et al., 2021).

66         Outro método de irrigação com efeitos positivos sobre a economia do uso da água é o  
67 de irrigação por aspersão, advindo do uso de pivô central por exemplo. Neste método, o arroz  
68 é cultivado durante todo o ciclo em solo oxidado, sem presença de lâmina de água, embora o  
69 conteúdo de água no solo deva ser mantido o mais próximo possível da saturação em função  
70 das exigências das cultivares disponíveis no mercado brasileiro (PINTO et al., 2020). No  
71 entanto, apesar da redução substancial do uso de água, a qual pode ser de até 50% em relação  
72 ao sistema de inundação (PINTO et al., 2020), a substituição promove mudanças ao ambiente  
73 e ao sistema de produção do arroz, o que exige adequações no manejo da cultura. Dessa  
74 forma, práticas de manejo que possibilitem a melhoria dos atributos físicos do solo, como a

75 escarificação são importantes para o adequado desempenho agrônômico da cultura nesse  
76 sistema de cultivo (ARF et al., 2005).

77 Além da manutenção da produtividade, a qualidade do grão deve ser considerada  
78 quando se visa a utilização de métodos alternativos de irrigação, pois é um fator fundamental  
79 para a sua comercialização, visto que grãos inteiros e sem defeitos (opacos e gessados)  
80 possuem maior valor de mercado (CANELLAS et al., 1997). O rendimento de grãos inteiros é  
81 influenciado por fatores como a genética do cultivar, as condições ambientais onde a planta é  
82 cultivada, umidade de colheita e pelos processos mecânicos de beneficiamento (CANELLAS  
83 et al., 1997; TELÓ et al., 2011). Estudos indicam que a ocorrência de estresse hídrico,  
84 principalmente na fase reprodutiva, pode promover prejuízos à qualidade de grãos produzidos,  
85 promovendo maior percentual de área gessada no grão e a redução do rendimento de grãos  
86 inteiros (SINGH et al., 2017; LAWAS et al., 2018).

87 Considerando que as cultivares de arroz irrigado são adaptadas às condições de  
88 inundação, mudanças no crescimento, desenvolvimento, produtividade e qualidade dos grãos  
89 podem ocorrer na ausência da presença da lâmina de água e da redução da disponibilidade  
90 hídrica à cultura (MEUS et al., 2018). No entanto, há uma grande variabilidade das respostas  
91 morfofisiológicas em cultivares quando submetidas a condições de menor disponibilidade  
92 hídrica do solo, as quais irão depender do período, duração e frequência em que a mesma  
93 ocorre (STRECK et al., 2019). Em vista do exposto, o estudo teve por objetivo avaliar os  
94 componentes do rendimento e a qualidade de grãos de cultivares de arroz submetidas a  
95 métodos e sistemas de irrigação.

96

## 97 **MATERIAL E MÉTODOS**

98 O experimento foi conduzido em condições de campo durante as safras agrícolas de  
99 2019/20 e 2020/21, em Santa Maria - RS, no Departamento de Fitotecnia da Universidade

100 Federal de Santa Maria. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é Cfa,  
101 subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes, tendo precipitação pluvial  
102 média anual de 1.688 mm. O solo é classificado como Planossolo Háptico Distrófico  
103 gleissolico (EMBRAPA, 2018), possuindo as seguintes características físico-químicas na  
104 camada de 0-0,2 m de profundidade: argila= 20%; MO= 2,1; pH em água (1:1)= 6,9;  
105 saturação de bases= 83,7; saturação por Al= 0,0%; P-Mehlich= 11,6 mg dm<sup>-3</sup>; K= 34,5 mg  
106 dm<sup>-3</sup>; S= 7,3 e CTC pH7= 14,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

107 A instalação do experimento foi realizada no delineamento de blocos ao acaso. Na  
108 safra 2019/20, o experimento foi composto por um fatorial 3x2, com quatro repetições. Os  
109 níveis do fator A foram compostos por métodos e sistemas de irrigação, sendo: (A1) irrigação  
110 contínua: o solo foi inundado no estágio V3 (COUNCE et al., 2000) da cultura do arroz,  
111 sendo mantida uma lâmina de água de 0,1 m até o estágio R7, procedendo-se então a  
112 supressão da irrigação; (A2) irrigação intermitente: nesse tratamento foi mantida lâmina  
113 contínua até o estágio V6, sendo retomada quando o solo atingisse a saturação. Esse processo  
114 foi realizado até o estágio R7, quando foi procedida a supressão da irrigação e; (A3) irrigação  
115 por aspersão convencional: a partir do estágio V3 foram fornecidas lâminas de irrigação  
116 através do monitoramento do conteúdo volumétrico de água no solo, sendo realizada a  
117 supressão da irrigação no estágio R9 da cultura. Na safra 2020/21, foi inserido um tratamento  
118 nesse fator, que consistiu da escarificação do solo associado à irrigação por aspersão  
119 convencional, compondo um fatorial 4x2 com quatro repetições. A escarificação foi realizada  
120 no mês de agosto de 2020, com um escarificador da marca KLR modelo AS5AL, que atuou a  
121 uma profundidade média de 0,3 m.

122 O critério utilizado para a irrigação no tratamento com aspersão convencional na  
123 safra 2019/20 foi a umidade volumétrica do solo em capacidade de campo, no qual era  
124 realizada a aplicação de uma lâmina líquida fixa de 8 mm, com aplicação média de 4 mm

125 hora<sup>-1</sup>, todo dia que se atingisse o conteúdo de água igual ou inferior a 0,36 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Na safra  
126 2020/21, o critério para a irrigação foi alterado, sendo fornecido uma lâmina de irrigação  
127 diária líquida suficiente para elevar a umidade volumétrica do solo à porosidade total (0,46 m<sup>3</sup>  
128 m<sup>-3</sup>). O monitoramento da umidade volumétrica do solo (Figura 1A e 1B) foi realizado através  
129 de sondas FDR, modelo CS-616 (Campbell Scientific, EUA), instaladas nas profundidades de  
130 0-0,1 e 0-0,2 m.

131 O fator D foi composto por duas cultivares de arroz irrigado, a cultivar de ciclo  
132 médio (IRGA 424 RI) e a cultivar de ciclo precoce (IRGA 431 CL). As unidades  
133 experimentais dos métodos de irrigação por superfície (irrigação contínua e intermitente)  
134 foram constituídas de 45,9 m<sup>2</sup> (1,53 m x 30 m). Já as unidades experimentais do tratamento  
135 irrigação por aspersão apresentaram dimensões de 360 m<sup>2</sup> (12 m x 30 m) na safra 2019/20 e  
136 por 180 m<sup>2</sup> (6 m x 30 m) na safra 2020/21.

137 A semeadura do arroz foi realizada nos dias 24 e 14 de outubro de 2020 e 2021,  
138 respectivamente, na densidade de 100 kg de sementes ha<sup>-1</sup>, com espaçamento entrelinhas de  
139 0,17 m. A adubação de base foi composta por 17 kg ha<sup>-1</sup> de N, 70 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 105 kg ha<sup>-1</sup>  
140 de K<sub>2</sub>O na safra 2019/20 e por 20 kg ha<sup>-1</sup> de N, 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na  
141 safra 2020/21. A adubação de cobertura na safra 2019/20 foi composta por 90 kg de N ha<sup>-1</sup> em  
142 V3 e 30 kg de N ha<sup>-1</sup> em V6 e R0. Na safra 2020/21, foi composta por 90 kg de N ha<sup>-1</sup> em V3,  
143 30 kg de N ha<sup>-1</sup> + 25 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> em V6 e 30 kg de N ha<sup>-1</sup> + 25 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> em R0. Os  
144 demais tratamentos culturais foram efetuados conforme as recomendações técnicas para a cultura  
145 (SOSBAI, 2018).

146 Na maturação fisiológica do arroz (estádio R9) foi realizada a contagem do número  
147 de panículas m<sup>-2</sup> e a coleta de 20 panículas por unidade experimental. O número de grãos por  
148 panícula foi calculado pela razão entre o número total de grãos formados e o número de

149 panículas colhidas na amostra, sendo avaliado também a massa de mil grãos e esterilidade de  
150 espiguetas.

151 A colheita do experimento foi realizada quando os grãos de arroz estavam com teor  
152 de umidade médio de 22%, sendo realizada de forma manual, em uma área útil de 4,08 m<sup>2</sup> por  
153 unidade experimental. Após a trilha, limpeza e pesagem dos grãos, os valores foram  
154 corrigidos para 13% de umidade e expressos em produtividade relativa, onde se comparou  
155 todos os métodos de irrigação com a irrigação contínua. Em relação às cultivares, a IRGA 424  
156 RI foi considerada como referência.

157 Após a colheita, foi realizado o beneficiamento de quatro subamostras de 100g para  
158 cada tratamento e realizado o beneficiamento em testadora de arroz da marca Zaccaria,  
159 modelo PAZ-1. A renda do benefício foi obtida de forma direta, pela pesagem dos grãos  
160 inteiros e quebrados após o polimento. Após, avaliou-se a porcentagem de grãos inteiros,  
161 grãos opacos e gessados através do analisador estatístico de arroz (S-21). Foram considerados  
162 grãos inteiros aqueles que apresentaram comprimento igual ou superior a 3/4 do comprimento  
163 mínimo da classe à qual predomina, que é de 6 mm; grãos opacos aqueles que apresentaram  
164 mais de 25% de área gessada e grãos gessados aqueles que apresentaram de 50 a 100% de  
165 área gessada.

166 Os dados climáticos foram obtidos da Estação Meteorológica Automática do 8º  
167 DISMET/INMET, que está localizada a aproximadamente 500 m do local onde foi instalado o  
168 experimento.

169 Os dados foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático. A  
170 análise da variância foi realizada através do teste F, e as médias dos fatores, quando  
171 significativas, foram submetidas ao teste de Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade de  
172 erro através do pacote estatístico SISVAR.

173

## 174 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

175           Para as variáveis número de panículas  $m^{-2}$ , número de grãos por panícula, massa de  
176 mil grãos, esterilidade de espiguetas e produtividade relativa, não houve interação entre os  
177 fatores analisados em ambas as safras agrícolas, havendo efeito isolado apenas dos métodos  
178 de irrigação para as variáveis número de grãos por panícula e produtividade relativa (Figura  
179 2). A irrigação contínua obteve produtividade de grãos média de  $12.337 \text{ kg ha}^{-1}$  na safra  
180 2019/20 e de  $12.039 \text{ kg ha}^{-1}$  na safra 2020/21, sendo descrita no estudo como 100%. A  
181 irrigação intermitente proporcionou produtividade de grãos semelhante à obtida pela irrigação  
182 contínua, não ocorrendo diferença estatística entre esses tratamentos, em ambas as safras.  
183 Atribui-se esse resultado à intensidade da intermitência utilizada, pois a irrigação era  
184 retomada quando o solo não apresentava lâmina de água sob a superfície, mas ainda estava  
185 saturado, não promovendo prejuízo às características produtivas da cultura. Resultados  
186 semelhantes foram obtidos por MASSEY et al. (2014), AVILA et al. (2015) e  
187 CARRACELAS et al. (2019), os quais também verificaram produtividade de grãos  
188 semelhante entre essas duas estratégias de irrigação. No presente estudo, não se verificou  
189 diferença quanto ao número de panículas por  $m^2$  entre os tratamentos, estando a produtividade  
190 de grãos relacionada à obtenção de maior número de grãos por panícula, sendo os tratamentos  
191 irrigação contínua e intermitente os que apresentaram as maiores médias, com valores de 92 e  
192 93 grãos por panícula na safra 2019/20 e de 96 e 94 grãos por panícula na safra 2020/21, não  
193 diferindo estatisticamente entre si em ambas as safras.

194           Menores médias de produtividade relativa foram observadas para o arroz irrigado por  
195 aspersão, com redução de 26% na safra 2019/20 e de 12% na safra 2020/21. Esse resultado  
196 está atribuído ao menor número de grãos por panícula obtido por esse tratamento, o qual  
197 obteve média de 70 grãos por panícula na safra 2019/20 e de 81 grãos por panícula na safra  
198 2020/21. A redução do número de grãos por panícula pela irrigação por aspersão pode estar

199 relacionada, em parte, à menor disponibilidade de água às plantas associada a períodos de  
200 elevada demanda evapotranspirativa. Com menor disponibilidade de água no solo,  
201 possivelmente houve a necessidade das plantas em reduzir a perda de água via transpiração,  
202 acarretando no fechamento dos estômatos e, conseqüentemente, na redução da taxa  
203 fotossintética, resultando na redução da disponibilidade de fotoassimilados para a formação  
204 de espiguetas férteis (TAIZ et al., 2017). Além disso, em ambiente aeróbico não estão  
205 presentes modificações químicas causadas pela inundação que beneficiam a cultura do arroz  
206 (PINTO et al., 2020), tais como o aumento do pH, da condutividade elétrica e conseqüente  
207 aumento da disponibilidade de nutrientes na solução do solo (PONNAMPERUMA, 1977),  
208 fato que pode ter limitado a oferta de nutrientes às plantas irrigadas por aspersão, provocando  
209 a redução do potencial produtivo da cultura.

210 As limitações físicas e químicas do solo ficam evidentes quando verificado o  
211 incremento do número de grãos por panícula e da produtividade relativa de grãos do arroz  
212 irrigado por aspersão, quando cultivado em solo escarificado, na safra 2020/21. A presença de  
213 impedimentos físicos do solo na camada de 0,05 – 0,10 m de profundidade, a qual apresentou  
214 valor de densidade do solo de  $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$  (dados não apresentados), foi superior à densidade  
215 crítica ( $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$ ) para esse tipo de solo (REICHERT et al., 2009), possivelmente  
216 limitando o crescimento de raízes em profundidade no perfil de solo e restringindo o acesso à  
217 água e nutrientes das camadas subsuperficiais, promovendo prejuízos aos parâmetros  
218 fisiológicos da cultura em períodos de elevada demanda evapotranspirativa.

219 A escarificação do solo reduziu a densidade na camada de 0,05 – 0,10 m de  
220 profundidade a  $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ , não ocorrendo valores superiores à densidade crítica até os 0,3 m  
221 de profundidade. Nesse caso, devido à eliminação dos impedimentos físicos do solo,  
222 possivelmente o crescimento do sistema radicular da planta ocorreu em maior profundidade  
223 no solo, possibilitando maior acesso à água e nutrientes, resultando em maior número de

224 grãos por panícula e produtividade relativa de arroz irrigado por aspersão, quando comparado  
225 ao cultivo em solo não escarificado.

226 A menor disponibilidade de água às plantas irrigadas por aspersão não influenciou  
227 apenas os componentes da produtividade e a produtividade de grãos da cultura, mas também a  
228 qualidade de grãos, resultando em menor rendimento de grãos inteiros e maior percentual de  
229 grãos opacos e gessados quando comparado ao cultivo inundado (Figura 3). O rendimento de  
230 grãos inteiros da irrigação por aspersão foi de 58% na safra 2019/20 e de 60% na safra  
231 2020/20, sendo as irrigações contínua e intermitente os tratamentos que apresentaram as  
232 maiores médias, com valores de 62% e 63% na safra 2019/20 e 63% na safra 2020/21,  
233 respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. Esses resultados corroboram com os  
234 obtidos por MASSEY et al. (2014) e SONG et al. (2021), os quais também não verificaram  
235 diferença do rendimento de grãos inteiros e de grãos gessados quando realizada a  
236 intermitência da irrigação quando comparado à irrigação contínua.

237 O menor rendimento de grãos inteiros verificado pela irrigação por aspersão está  
238 relacionado à obtenção dos maiores valores de grãos opacos e gessados. Segundo ISHIMARU  
239 et al. (2009), grãos opacos e gessados originam-se devido a um distúrbio no arranjo das  
240 moléculas de amido e proteínas nos grãos, tendo o espaço entre as moléculas preenchido com  
241 ar. Assim, durante o cultivo, ocorre o sucessivo umedecimento e secagem dos grãos de arroz  
242 devido as irrigações realizadas por aspersão, podendo ocorrer a formação de fissuras e ou  
243 defeitos nos grãos (regiões de menor resistência), podendo ocasionar quebra do grão no  
244 processo de beneficiamento, reduzindo o rendimento de grãos inteiros (MARCHEZAN et al.,  
245 1992).

246 A formação do gesso nos grãos de arroz está diretamente relacionada à ocorrência de  
247 elevadas temperaturas durante o período de enchimento de grãos, a qual interfere no balanço  
248 hídrico da planta e resulta na redução da atividade enzimática relacionada à translocação de

249 fotoassimilados aos grãos, com redução do acúmulo de amilose (ISHIMARU et al., 2009).  
250 Nesse sentido, verifica-se que a elevada demanda evapotranspirativa durante o período de  
251 enchimento de grãos nas safras 2019/20 e 2020/21 (Figuras 1C e 1D), associada à menor  
252 disponibilidade de água à cultura no tratamento com irrigação por aspersão resultou em menor  
253 rendimento de grãos inteiros quando comparado ao cultivo inundado. Resultados semelhantes  
254 foram obtidos por MEUS et al. (2018), no qual os autores também verificaram maior área  
255 gessada do grão e menor rendimento de grãos inteiros de arroz irrigado por aspersão, quando  
256 comparado ao cultivo inundado.

257 No presente estudo, verificou-se redução da área gessada dos grãos e dos grãos  
258 gessados no cultivo irrigado por aspersão quando realizada a escarificação do solo na safra  
259 2021. A maior disponibilidade de água às plantas pelo cultivo do arroz irrigado por aspersão  
260 em solo escarificado pode ter atenuado os efeitos nocivos às plantas causados por períodos de  
261 elevada demanda evapotranspirativa, possibilitando redução do percentual de defeitos nos  
262 grãos com consequente incremento do rendimento de grãos inteiros.

263 A área gessada é determinante para a porcentagem de grãos inteiros, sendo a mesma  
264 determinada principalmente pelos fotoassimilados acumuladas durante todo o período de  
265 desenvolvimento da cultura (LONDERO et al., 2015). No entanto, existe a dependência de  
266 efeitos genéticos para que os fotoassimilados sejam acumulados na fase de enchimento de  
267 grãos (SHI et al., 2002), podendo explicar a diferença para o rendimento de grãos inteiros,  
268 área gessada e grãos gessados em função da cultivar utilizada. Nesse sentido, verifica-se que a  
269 cultivar IRGA 424 RI obteve maior porcentagem de área gessada e de grãos gessados,  
270 resultando em menor rendimento de grãos inteiros quando comparada a cultivar IRGA 431  
271 CL em ambas as safras. O efeito da diferença entre os genótipos quando ao surgimento de  
272 grãos gessados também foi verificado por MARCHEZAN et al. (1992), LONDERO et al.

273 (2015) e LAWAS et al. (2018), podendo o resultado verificado no presente estudo estar  
274 atribuído às características genéticas de cada cultivar.

275 Diante dos resultados encontrados, verificou-se que não há redução da qualidade de  
276 grãos com adoção de sistemas de irrigação mais eficientes como a irrigação intermitente. No  
277 caso da aspersão, houve maior percentual de grãos opacos e gessados, além de redução de  
278 grãos inteiros. No entanto, ao realizar a escarificação obteve-se incremento da qualidade de  
279 grãos de arroz irrigado por aspersão. Portanto, nesse sistema de cultivo, a qualidade física do  
280 solo deve ser observada afim de realizar manejos como a escarificação quando houver  
281 necessidade, visando o melhor aproveitamento da água advinda da irrigação e precipitações,  
282 para prover em períodos de maior demanda atmosférica, conteúdo de água no solo suficiente  
283 para suprir a necessidade da cultura, provendo acréscimo da produtividade e da qualidade de  
284 grãos da cultura.

285

## 286 **CONCLUSÃO**

287 A irrigação por aspersão reduz o número de grãos por panícula e a produtividade de  
288 grãos, proporciona maior percentual de grãos opacos e gessados e reduz o rendimento de  
289 grãos inteiros de arroz.

290 A escarificação do solo proporciona aumento do número de grãos por panícula e da  
291 produtividade de grãos, reduz o percentual de grãos opacos e gessados e promove maior  
292 rendimento de grãos inteiros de arroz quando irrigado por aspersão.

293 A irrigação intermitente não reduz a produtividade e a qualidade de grãos de arroz  
294 quando comparada à irrigação contínua.

295 A cultivar IRGA 431 CL contém menor percentual de grãos opacos e gessados e maior  
296 rendimento de grãos inteiros quando comparado à cultivar IRGA 424 RI.

297

298 **AGRADECIMENTOS**

299 Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela  
300 bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor e pela bolsa de produtividade em pesquisa ao  
301 segundo autor.

302

303 **DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES**

304 Os autores declaram não haver conflito de interesses.

305

306 **CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES**

307 Os autores contribuíram igualmente para o manuscrito.

308

309 **REFERÊNCIAS**

310 ARF, O. et al. Manejo do solo e época de aplicação de nitrogênio na produção de arroz de  
311 terras altas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, p. 215-223, 2005. Disponível em:  
312 <<https://www.redalyc.org/pdf/3030/303026558004.pdf>>. Acesso em: Jun. 6, 2021.

313 AVILA, L. A. et al. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent  
314 irrigation. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p.442-448, 2015. Disponível em:  
315 <<https://doi.org/10.2134/agronj14.0080>>. Acesso em: Mar. 18, 2021. doi:  
316 10.2134/agronj14.0080.

317 CARRACELAS, G. et al. Irrigation management strategies to increase water productivity in  
318 *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. **Agricultural Water Management**, v. 222, p.161-172, 2019.  
319 Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.049>>. Acesso em: Mar. 21, 2021.  
320 doi: 10.1016/j.agwat.2019.05.049.

- 321 CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. 2021. Disponível em:  
322 <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em:  
323 Jun. 7, 2021.
- 324 COUNCE, P. A. et al. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice  
325 development. **Crop Science**, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000. Disponível em:  
326 <<https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>>. Acesso em: Fev. 7, 2021. doi:  
327 10.2135/cropsci2000.402436x.
- 328 EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356p.
- 329 ISHIMARU, T. et al. Formation of grain chalkiness and changes in water distribution in  
330 developing rice caryopses grown under high-temperature stress. **Journal of Cereal Science**,  
331 v. 50, n. 2, p. 166-174, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.04.011>>.  
332 Acesso em: Jun. 12, 2021. doi: 10.1016/j.jcs.2009.04.011.
- 333 LAWAS, L. M. F. et al. Combined drought and heat stress impact during flowering and grain  
334 filling in contrasting rice cultivars grown under field conditions. **Field Crops Research**, v.  
335 229, p. 66-77, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.09.009>>. Acesso em:  
336 Jun. 19, 2021. doi: 10.1016/j.fcr.2018.09.009.
- 337 LONDERO, G. P. et al. Qualidade industrial de grãos de arroz decorrente da supressão da  
338 irrigação e umidade de colheita. **Irriga**, v. 20, n. 3, p. 587-601, 2015. Disponível em:  
339 <<https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p587>>. Acesso em: Mar. 19, 2021. doi:  
340 10.15809/irriga.2015v20n3p587.
- 341 MARCHEZAN, E. et al. Ocorrência de grãos gessados em três cultivares de arroz. **Scientia**  
342 **Agrícola**, v. 49, p. 87-91, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1590/S0103-](https://doi.org/10.1590/S0103-90161992000400012)  
343 [90161992000400012](https://doi.org/10.1590/S0103-90161992000400012)>. Acesso em: Jun. 15, 2021. doi: 10.1590/S0103-90161992000400012.
- 344 MASSEY, J. H. et al. Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice  
345 irrigation in Mississippi. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 297–304, 2014.

- 346 Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.023>>. Acesso em: Fev. 17, 2021.  
347 doi: 10.1016/j.agwat.2014.08.023.
- 348 MEUS, L. D. et al. Classification of rice grains of lowland cultivars grown under flood  
349 irrigation and sprinkler irrigation. **Engenharia Agrícola**, v. 38, p. 599-605, 2018. Disponível  
350 em: <<https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4p599-605/2018>>. Acesso em: Abr.  
351 2, 2021. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4p599-605/2018.
- 352 PINTO, M. A. B. et al. Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as  
353 a function of water availability in different phenological phases. **Field Crops Research**, v.  
354 248, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107714>>. Acesso em: Abr. 14,  
355 2021. doi: 10.1016/j.fcr.2020.107714.
- 356 PONNAMPERUMA, F. N. **Physiological properties of submerged soil in relation to**  
357 **fertility**. Filipinas: Los Baños, 1977. 32p.
- 358 REICHERT, J. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till  
359 crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n.  
360 2, p. 242–254, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>>. Acesso  
361 em: Jun. 13, 2021. doi: 10.1016/j.still.2008.07.002.
- 362 SHI, C. H. et al. Genetic analysis of transparency and chalkiness area at different filling stages  
363 of rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Research**, v. 76, n. 1, p. 1-9, 2002. Disponível em:  
364 <[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00011-4)>. Acesso em: Jul. 14, 2021. doi:  
365 10.1016/S0378-4290(02)00011-4.
- 366 SINGH, H. et al. Crop establishment method and irrigation schedule effect on water  
367 productivity, quality, economics and energetics of aerobic direct-seeded rice (*Oryza sativa*  
368 L.). **Paddy and Water Environment**, v. 15, n. 1, p. 101-109, 2017. Disponível em:  
369 <<https://doi.org/10.1007/s10333-016-0532-4>>. Acesso em: Jun. 10, 2021. doi:  
370 10.1007/s10333-016-0532-4.

371 SONG, T. et al. Alternate wetting and drying irrigation and phosphorus rates affect grain yield  
372 and quality and heavy metal accumulation in rice. **Science of the Total Environment**, v. 752,  
373 p. 141862, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141862>>. Acesso  
374 em: 6 Jul. 2021. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141862.

375 SOSBAI. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Rio  
376 grande do Sul: Farroupilha. 2018. 209p.

377 STRECK, E. A. et al. Desempenho agrônômico de cultivares de arroz sob sistema de  
378 irrigação por aspersão e inundação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p.  
379 1-7, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a5661>>. Acesso em: Abr. 18,  
380 2021. doi: 10.5039/agraria.v14i3a5661.

381 TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017.  
382 888p.

383 TELÓ, G. M. et al. Grain quality of irrigated rice harvested at different moisture contents  
384 depending on fungicide application. **Ciência Rural**, v. 41, n. 6, p. 960-966, 2011. Disponível  
385 em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000600007>>. Acesso em: Jun. 10, 2021. doi:  
386 10.1590/S0103-84782011000600007.

387

388

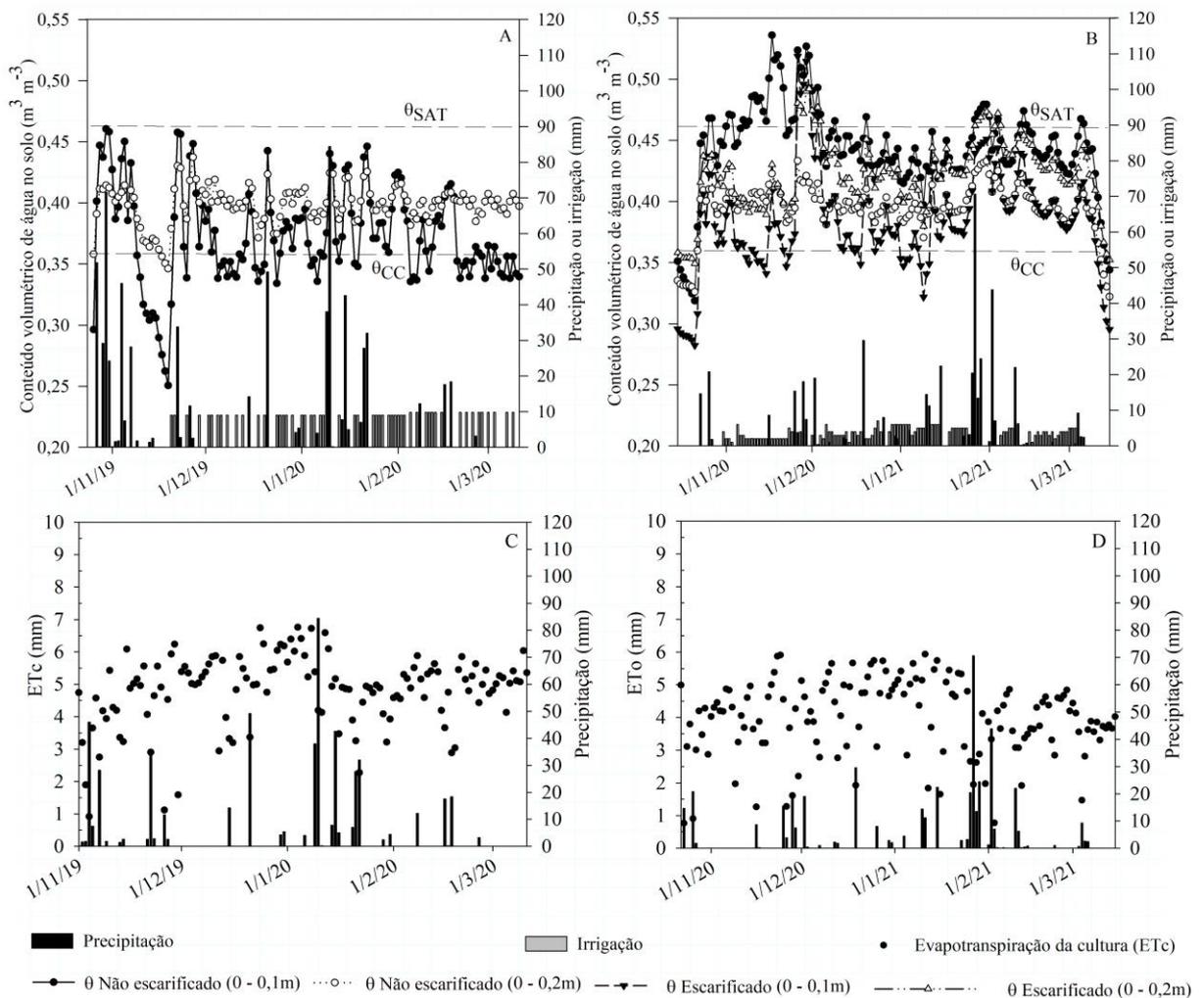
389

390

391

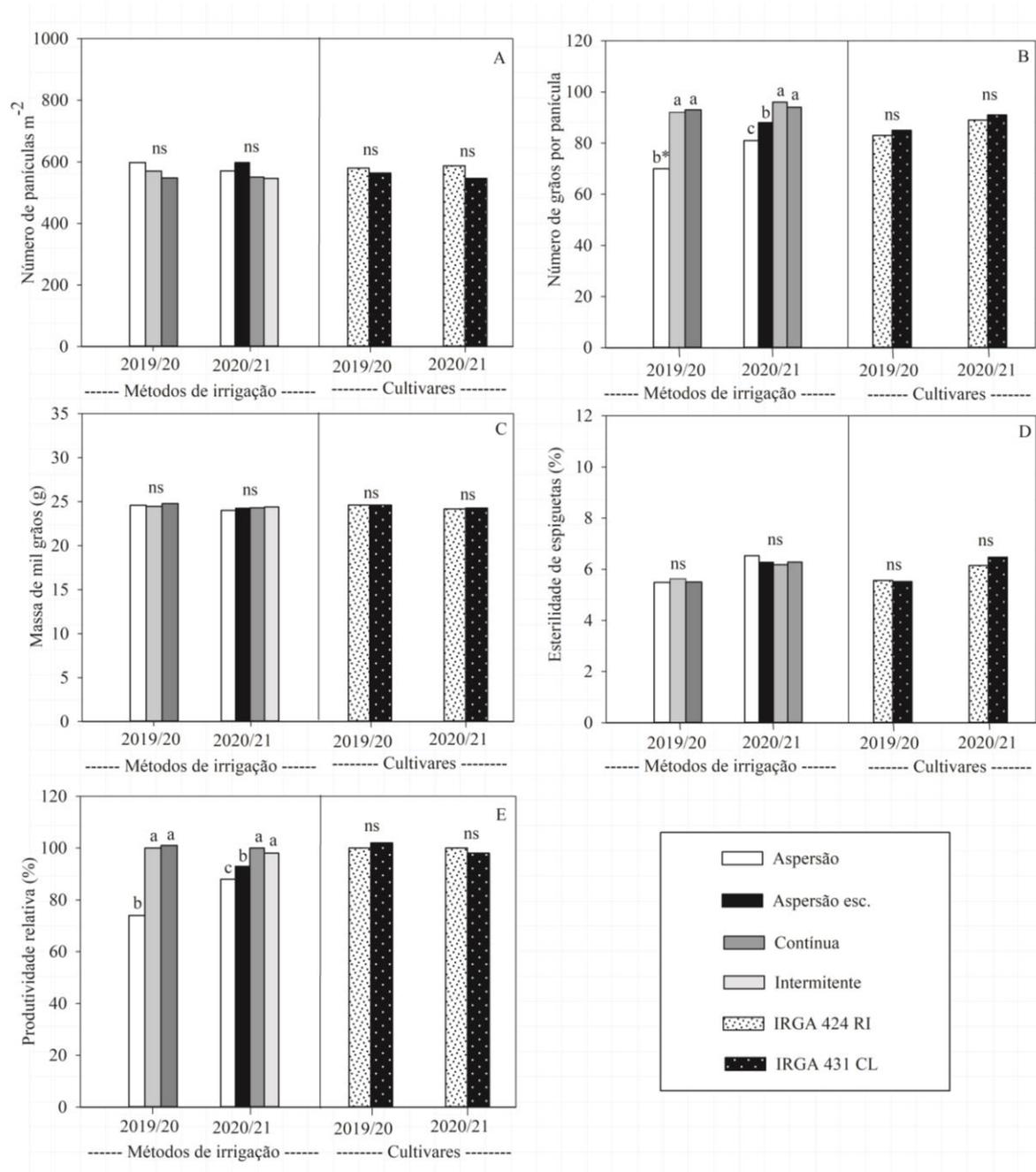
392

393



395      Figura 1 - Conteúdo volumétrico de água no solo no método de irrigação por aspersão  
 396      cultivado com arroz nas safras agrícolas 2019/20 (A) e 2020/21 (B). Precipitação  
 397      pluviométrica e evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) nas safras 2019/20 (C) e 2020/21 (D).  
 398      θ<sub>SAT</sub> = Conteúdo volumétrico de água no solo na saturação. θ<sub>CC</sub> = Conteúdo volumétrico de  
 399      água no solo na capacidade de campo.

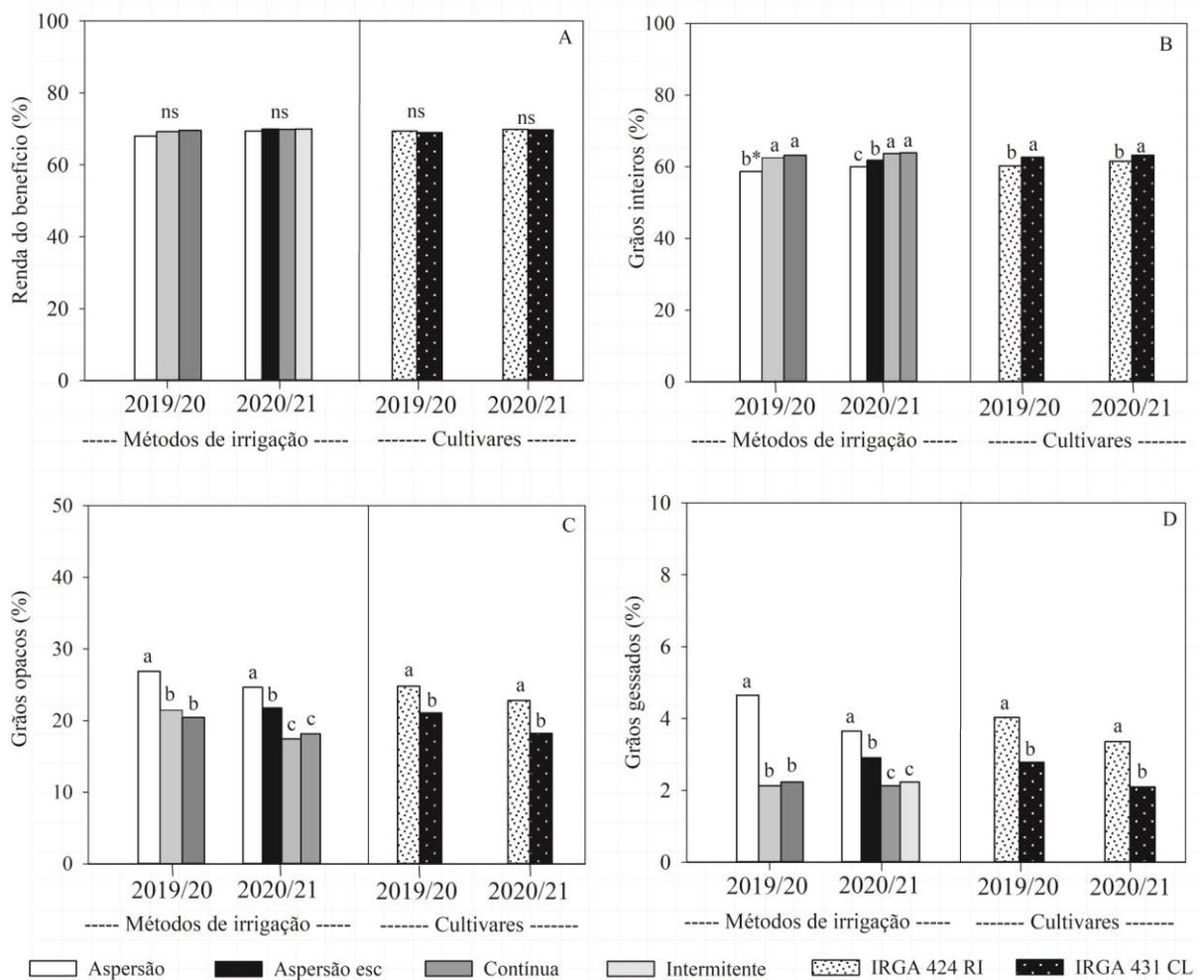
400



401

402 Figura 2 – (A) Número de panículas por m<sup>2</sup>, (B) número de grãos por panícula, (C) massa de  
 403 mil grãos, (D) esterilidade de espiguetas e produtividade relativa (E) das cultivares de arroz  
 404 irrigado IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos de irrigação nas safras 2019/20  
 405 e 2020/21. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott em  
 406 nível de 5% de probabilidade de erro. <sup>ns</sup>Não significativo pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

407



408

409 Figura 3 – (A) Renda do benefício, (B) grãos inteiros, (C) grãos opacos e (D) grãos gessados  
 410 das cultivares de arroz irrigado IRGA 424 RI e IRGA 431 CL em função de métodos de  
 411 irrigação nas safras 2019/20 e 2020/21. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si  
 412 pelo teste de Scott Knott em nível de 5% de probabilidade de erro. <sup>ns</sup>Não significativo pelo  
 413 teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

#### 1 4 CAPÍTULO III (Artigo Científico)

### 3 Emissão de CH<sub>4</sub> e potencial de aquecimento global em métodos de irrigação e 4 cultivares de arroz

### 5 CH<sub>4</sub> emission and global warming potential in irrigation systems and rice cultivars

7 Bruno Behenck Aramburu<sup>1\*</sup>

#### 9 RESUMO

10 O cultivo do arroz irrigado é uma fonte de emissão de gases de efeito estufa. O método  
11 de irrigação tem efeito determinante na condição de oxirredução de solos cultivados com  
12 arroz, refletindo-se nas emissões de metano e óxido nitroso. Além disso, a emissão desses  
13 gases varia em função do tipo de solo, do manejo da lavoura e da cultivar utilizada. Portanto,  
14 o estudo teve como objetivo avaliar a influência de métodos e sistemas de irrigação sobre as  
15 emissões de metano e de óxido nitroso, bem como quantificar o potencial de aquecimento  
16 global parcial (PAGp) e a relação com a produtividade de grãos (PG) de cultivares de arroz  
17 irrigado. Para tal, dois experimentos de campo foram conduzidos nas safras agrícolas de  
18 2019/20 e 2020/21. No fator A testou-se a irrigação por inundação (contínua e intermitente) e  
19 aspersão e, para o fator D, foram testadas as cultivares de arroz IRGA 424 RI e IRGA 431  
20 CL, em um fatorial 3x2. O método de irrigação por aspersão promove redução da emissão de  
21 metano do solo em cultivo de arroz, porém, potencializa as emissões de óxido nitroso. A  
22 emissão de metano não foi influenciada pela intensidade da intermitência utilizada, sendo o  
23 PAGp/PG da irrigação intermitente semelhante à irrigação contínua. As cultivares de arroz  
24 irrigado IRGA 424 RI e IRGA 431 CL não influenciaram nos fluxos e a emissão total de

1 metano e óxido nitroso, bem como o potencial de aquecimento global parcial e a  
2 produtividade de grãos, contendo valores semelhantes de PAGp/PG.

3 **Palavras-chave:** *Oryza sativa* L., metano, óxido nitroso, irrigação contínua, irrigação  
4 intermitente, aspersão.

5

## 6 **ABSTRACT**

7         The cultivation of irrigated rice is a source of greenhouse gas emissions. The irrigation  
8 method has a determining effect on the oxidation-reduction condition of soils sowed with rice,  
9 reflecting on methane and nitrous oxide emissions. In addition, the emission of these gases  
10 varies depending on the type of soil, the management of the crop and the variety used.  
11 Therefore, the study aimed to evaluate the influence of methods and systems of irrigation on  
12 methane and nitrous oxide emissions, as well as to quantify the partial global warming  
13 potential and its relationship with grain yield of irrigated rice varieties. For that, a field  
14 experiment was carried out in the 2019/20 and 2020/21 crop seasons. Sprinkler and border  
15 irrigation methods (continuous and intermittent) were tested for factor A. For factor D, the  
16 rice varieties IRGA 424 RI and IRGA 431 CL were tested in a 3x2 factorial. The sprinkler  
17 irrigation method promotes reduction of methane emissions from the soil in rice cultivation,  
18 however, it enhances nitrous oxide emissions. Methane emission was not influenced by the  
19 intensity of intermittence used, being the PAGp/PG of intermittent irrigation similar to  
20 continuous irrigation. The irrigated rice varieties IRGA 424 RI and IRGA 431 CL did not  
21 influence the fluxes and total emission of methane and nitrous oxide, as well as the partial  
22 global warming potential and grain yield, containing similar values of PAGp/PG.

23 **Key words:** *Oryza sativa* L., methane, nitrous oxide, continuous irrigation, intermittent  
24 irrigation, sprinkler.

## 1 INTRODUÇÃO

2 O efeito estufa é um processo físico que ocorre devido à concentração de determinados  
3 gases na atmosfera, podendo ocorrer de forma natural e/ou antrópica (BAYER et al., 2014). O  
4 aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>),  
5 metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) altera o balanço energético do sistema atmosférico, o que  
6 leva a mudanças climáticas subsequentes (IPCC, 2014). No Brasil, o setor agropecuário  
7 contabilizou 439.213 Gg CO<sub>2</sub>eq em 2016, representando 33,6% do total de emissões  
8 brasileiras. Desse total, a lavoura de arroz irrigado contribuiu com 2,2% das emissões (MCTI,  
9 2020), principalmente devido à emissão do CH<sub>4</sub>, que ocorre em função do alagamento do  
10 solo.

11 Em solos cultivados com arroz irrigado no sistema de alagamento contínuo, a  
12 condição de anaerobiose resulta na produção de CH<sub>4</sub> como produto final da decomposição de  
13 compostos orgânicos por bactérias metanogênicas (BAYER et al., 2012). Essa condição é  
14 atingida após a redução da maioria dos íons inorgânicos, quando as bactérias passam a utilizar  
15 o carbono como aceptor de elétrons (PETERS & CONRAD, 1996). Assim, o  
16 desenvolvimento de práticas de irrigação alternativas pode alterar a dinâmica de emissão de  
17 GEE, reduzindo a emissão de CH<sub>4</sub> de lavouras de arroz inundado. No entanto, as práticas de  
18 irrigação alternativas à inundação e que visam reduzir a emissão de CH<sub>4</sub>, podem proporcionar  
19 o aumento do N<sub>2</sub>O, o que precisa ser considerado, pois o N<sub>2</sub>O contém potencial de  
20 aquecimento global 265 vezes maior que o CO<sub>2</sub>, enquanto o CH<sub>4</sub> é 28 vezes maior (IPCC,  
21 2014).

22 Como alternativa ao método de irrigação por alagamento com fornecimento contínuo  
23 de água à cultura, o fornecimento intermitente de água possibilita a redução da altura da  
24 lâmina de água até atingir nível próximo ou igual ao do solo. Desta forma, ocorre o aumento  
25 da oxigenação do sistema, o que resulta na oxidação do CH<sub>4</sub> retido no solo (BAYER et al.,

1 2012). Essa prática, denominada irrigação intermitente, pode ser utilizada ao longo de todo o  
2 ciclo de cultivo do arroz irrigado, sem prejuízo à produtividade de grãos (MASSEY et al.,  
3 2014; AVILA et al., 2015; CARRACELAS et al., 2019). Contudo, ciclos alternados de  
4 anaerobiose e aerobiose favorecem a redução das emissões de CH<sub>4</sub>, mas igualmente  
5 aumentam as de N<sub>2</sub>O, quando comparados às condições de alagamento contínuo (HWANG et  
6 al., 2017).

7 Outro método de irrigação com potencial de redução da emissão de CH<sub>4</sub> é o cultivo do  
8 arroz irrigado por aspersão, como a irrigação por pivô (central ou linear). Nesse sistema de  
9 cultivo, o arroz é cultivado durante todo o ciclo em solo oxidado, embora o teor de água no  
10 solo seja mantido o mais próximo possível da saturação (PINTO et al., 2020). Assim, esse  
11 método de irrigação não deve ser favorável à produção de CH<sub>4</sub>, pois o solo é mantido  
12 oxidado; mas deve estar sujeito a maiores emissões de N<sub>2</sub>O, uma vez que possibilita a  
13 alternância dos processos de nitrificação/desnitrificação, que têm como produto intermediário  
14 esse gás de efeito estufa (SAPKOTA et al., 2020).

15 Alternativamente aos métodos e sistemas de irrigação, a seleção de cultivares de arroz  
16 irrigado é uma opção de manejo que afeta a emissão de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (RECTOR et al., 2018).  
17 As cultivares apresentam grande variação nas características morfofisiológicas, inclusive  
18 diferenças na capacidade de transporte de CH<sub>4</sub>. Em lavouras de arroz, apenas uma pequena  
19 porcentagem do CH<sub>4</sub> produzido é emitido por ebulição ou difusão do solo para a atmosfera  
20 diretamente pela lâmina de água, os aerênquimas das plantas de arroz atuam como tubulações,  
21 permitindo trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, sendo responsável por mais de 90% do  
22 CH<sub>4</sub> emitido durante a fase reprodutiva das plantas de arroz (AULAKH et al., 2000). Assim,  
23 a alta plasticidade fenotípica, o crescimento das plantas e as características morfofisiológicas  
24 são diferenças que interferem nos padrões de emissão de CH<sub>4</sub> (SIMMONDS et al., 2015).

1           Diante do exposto, o estudo teve como objetivo avaliar a influência de métodos e  
2 sistemas de irrigação sobre as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, bem como quantificar o potencial de  
3 aquecimento global parcial (PAGp) e a relação com o rendimento de grãos de cultivares de  
4 arroz irrigado.

5

## 6 **MATERIAL E MÉTODOS**

7           O experimento foi conduzido sob condições de campo durante as safras de 2019/20 e  
8 2020/21, em Santa Maria - RS, no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de  
9 Santa Maria. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é Cfa, subtropical úmido,  
10 sem estação seca definida e com verões quentes, tendo precipitação pluvial média anual de  
11 1.688 mm. O solo é classificado como Planossolo Háptico Distrófico gleissólico (SANTOS et  
12 al., 2018), possuindo as seguintes características físico-químicas na camada de 0-0,2 m de  
13 profundidade: teor de argila= 220 g kg<sup>-1</sup>; silte= 490 g kg<sup>-1</sup>; areia= 290 g kg<sup>-1</sup>; matéria  
14 orgânica= 2,1%; pH em água (1:1)= 6,9; saturação de bases= 83,7; saturação por Al= 0,0%;  
15 P-Mehlich= 11,6 mg dm<sup>-3</sup>; K= 34,5 mg dm<sup>-3</sup>; S= 7,3 mg dm<sup>-3</sup> e CTC pH7= 14,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

16           A instalação do experimento foi realizada no delineamento de blocos ao acaso, em  
17 um fatorial 3x2 com quatro repetições. Os níveis do fator A foram compostos por métodos e  
18 sistemas de irrigação, sendo: (A1) irrigação contínua: o solo foi inundado no estádio V3, da  
19 escala fenológica de COUNCE et al. (2000) da cultura do arroz, sendo mantida uma lâmina de  
20 água de 0,1 m até o estádio R7, quando irrigação foi suprimida; (A2) irrigação intermitente: o  
21 solo foi inundado no estádio V3 da cultura do arroz, sendo mantida uma lâmina de água de  
22 0,1 m até o estádio V6, quando a irrigação foi suprimida, sendo retomada sempre que a  
23 lâmina de água chegava ao nível da superfície, de forma a manter o solo em umidade de  
24 saturação. Esse processo foi realizado até o estádio R7, quando foi procedida a supressão da

1 irrigação e; (A3) irrigação por aspersão convencional: lâminas de irrigação foram aplicadas a  
2 partir do estágio V3 até o estágio R9 da cultura, quando as irrigações foram suprimidas.

3 Na safra 2019/20, lâminas fixas de 8 mm (líquidas) eram aplicadas sempre que a  
4 umidade volumétrica do solo atingia a capacidade de campo ( $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), usando-se um  
5 sistema de aspersão convencional fixo, com taxa de aplicação média de  $4 \text{ mm hora}^{-1}$ . Na safra  
6 2020/21, o critério para a irrigação foi alterado, sendo fornecida uma lâmina de irrigação  
7 diária líquida suficiente para elevar a umidade volumétrica de água no solo a porosidade total  
8 ( $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). O monitoramento da umidade volumétrica do solo (Figura 1A e 1B) foi  
9 realizado através de sondas FDR, modelo CS-616 (Campbell Scientific, EUA), instaladas nas  
10 profundidades de 0-0,1 e 0-0,2 m.

11 O fator D foi composto por duas cultivares de arroz irrigado, a cultivar de ciclo  
12 médio (D1) (IRGA 424 RI) e a cultivar de ciclo precoce (D2) (IRGA 431 CL). As unidades  
13 experimentais dos métodos de irrigação por superfície pelos sistemas com fornecimento  
14 contínuo e intermitente foram compostas por  $45,9 \text{ m}^2$  ( $1,53 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ). Já as unidades  
15 experimentais do tratamento irrigação por aspersão foram compostas por  $360 \text{ m}^2$  ( $12 \text{ m} \times 30$   
16  $\text{m}$ ) na safra 2019/20 e por  $180 \text{ m}^2$  ( $6 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ) na safra 2020/21.

17 A semeadura do arroz foi realizada nos dias 24 e 14 de outubro de 2019 e 2020,  
18 respectivamente, na densidade de  $100 \text{ kg}$  de sementes  $\text{ha}^{-1}$ , com espaçamento entrelinhas de  
19  $0,17 \text{ m}$ . A adubação de base na safra 2019/20 foi composta por  $7 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $70 \text{ kg ha}^{-1}$  de  
20  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $105 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  e na safra 2020/21 por  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $80 \text{ kg}$   
21  $\text{ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ . A adubação de cobertura na safra 2019/20 foi composta por  $90 \text{ kg}$  de N  $\text{ha}^{-1}$  em  
22 V3 e  $30 \text{ kg}$  de N  $\text{ha}^{-1}$  em V6 e R0. Na safra 2020/21 foi composta por  $90 \text{ kg}$  de N  $\text{ha}^{-1}$  em V3,  
23  $30 \text{ kg}$  de N  $\text{ha}^{-1}$  +  $25 \text{ kg}$  de  $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$  em V6 e  $30 \text{ kg}$  de N  $\text{ha}^{-1}$  e  $25 \text{ kg}$  de  $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$  em R0. Os  
24 demais tratamentos culturais foram efetuados conforme as recomendações técnicas para a cultura  
25 (SOSBAI, 2018).

1           As coletas de gases foram realizadas semanalmente, com início no dia da semeadura  
2 até a colheita da cultura, com auxílio de sistema composto por uma base e uma câmara  
3 conforme método da câmara estática fechada, proposto por MOSIER (1989), no horário das  
4 9h às 12h, período em que a concentração dos gases no ambiente representa a emissão média  
5 diária (GOMES et al., 2009). As dimensões das câmaras quadradas em aço galvanizado foram  
6 de 0,20 m de altura e 0,40 m de lado. Para a realização das avaliações durante o período de  
7 cultivo do arroz e por ocasião do crescimento das plantas, foram inseridos extensores (0,50 x  
8 0,40 x 0,40 m) junto a base (0,40 x 0,40 x 0,40m), fixa a 0,10 m de profundidade, para  
9 adequar a altura da câmara às plantas de arroz. Durante o período de avaliações de emissão de  
10 GEE, as bases foram alocadas nas parcelas, de modo que três fileiras de semeadura do arroz  
11 estivessem no interior de cada base.

12           Cada câmara possuía um ventilador tipo “cooler” no seu interior, o qual foi  
13 conectado e ligado a uma bateria de 12V durante 30 segundos para homogeneização da  
14 atmosfera interna imediatamente antes de cada coleta de ar. Na parte superior da câmara,  
15 existia uma válvula de três vias, pela qual foram coletadas as amostras de ar. As amostras  
16 foram coletadas com seringas de polipropileno de 20 mL, em quatro intervalos de tempo após  
17 a colocação da câmara sobre a base 0, 8, 16 e 24 min. Após cada coleta, as amostras foram  
18 transferidas para tubos de vidro, denominados exetainers, sendo posteriormente encaminhados  
19 para o Laboratório de Pesquisa em Biotransformações de Carbono e Nitrogênio (LABCEN),  
20 para a determinação das concentrações de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O por cromatografia gasosa (Shimadzu  
21 GC – 2014 modelo Greenhouse).

22           Os fluxos dos gases foram calculados de acordo com a expressão:  $f = \Delta Q / \Delta t \times$   
23  $PV / RT \times M / A$ ; em que  $f$  é o fluxo de CH<sub>4</sub> ou N<sub>2</sub>O (g ha<sup>-1</sup> por dia);  $\Delta Q / \Delta t$  é a variação na  
24 concentração do gás (mol h<sup>-1</sup>) na câmara, no momento da colheita;  $P$  é a pressão atmosférica  
25 (atm) no interior da câmara, que foi assumida como 1 atm,  $V$  é o volume da câmara, (L)  $R$  é a

1 constante dos gases ideais ( $0,08205 \text{ atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); T é a temperatura dentro da câmara no  
2 momento da coleta (K); M é a massa molar do gás ( $\mu\text{g mol}^{-1}$ ); e A é a área da base da câmara  
3 ( $\text{m}^2$ ). As emissões acumuladas de  $\text{CH}_4$  ou  $\text{N}_2\text{O}$  foram calculadas a partir da integral da área  
4 sob a curva, estabelecida pela interpolação dos valores diários de emissão (BAYER et al.,  
5 2014).

6 Com base na emissão acumulada de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  e considerando o potencial de  
7 aquecimento global de cada gás em relação ao  $\text{CO}_2$  – 28 vezes para o  $\text{CH}_4$  e 265 vezes para o  
8  $\text{N}_2\text{O}$ , num horizonte de 100 anos, foram calculadas as emissões em quantidades de  $\text{CO}_2$   
9 equivalente ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ) (IPCC, 2014).

10 A soma desses equivalentes foi denominada de Potencial de Aquecimento Global  
11 parcial (PAGp), calculado pela expressão:  $\text{PAGp} = (\text{CH}_4 \times 28) + (\text{N}_2\text{O} \times 265)$ , onde o PAGp é  
12 o potencial de aquecimento global parcial ( $\text{kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$ ) e  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  são as emissões no  
13 período avaliado ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Foi calculada também a relação entre o PAGp e a produtividade de  
14 grãos, conforme a expressão:  $\text{PAGpProd} = \text{PAGp}/\text{prod}$ .

15 A colheita do experimento foi realizada quando os grãos de arroz estavam com  
16 umidade média de 22%, sendo realizada de forma manual na área útil ( $4,08 \text{ m}^2$ ) de cada  
17 unidade experimental. Após a trilha, limpeza e pesagem dos grãos, os valores foram  
18 corrigidos para 13% de umidade e convertidos para  $\text{kg ha}^{-1}$ .

19 Os dados meteorológicos foram obtidos da Estação Automática de Meteorologia, do  
20 Departamento de Fitotecnia da UFSM, distante 500m do local do experimento (Figura 1C e  
21 1D).

22 Os fluxos diários de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  foram calculados por interpolação linear e a emissão  
23 acumulada de cada um dos gases foi calculada somando as quantidades emitidas em cada  
24 intervalo de coleta. Para isso, foi calculada a média dos fluxos de cada gás entre duas coletas

1 consecutivas, multiplicando-se o valor resultante pelo intervalo de tempo decorrido entre as  
2 referidas coletas, somando-se o valor acumulado da coleta anterior.

3 Os dados foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático. A  
4 análise da variância foi realizada através do teste F, e as médias dos fatores, quando  
5 significativas, foram submetidas ao teste de Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade de  
6 erro através do software SISVAR (5.6).

## 7 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

8  
9 Não houve interação entre os fatores para nenhuma das variáveis analisadas, havendo  
10 efeito isolado para os métodos de irrigação em ambas as safras. No período compreendido  
11 entre a emergência das plântulas de arroz e o início da irrigação da cultura, praticamente não  
12 se detectou emissão de CH<sub>4</sub>, dado que o solo se encontrava drenado e, portanto, oxidado,  
13 condição que não predispõe à produção de CH<sub>4</sub>. Esse comportamento se manteve por  
14 aproximadamente 17 dias após o início do alagamento (DAA) nas irrigações contínua e  
15 intermitente, quando os fluxos de CH<sub>4</sub> começaram a aumentar, sendo observados valores de  
16 0,12 e 0,15 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2019/20 (Figura 2A) e de 0,20 e 0,22 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>  
17 dia<sup>-1</sup> na safra 2020/21 (Figura 2B), respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si.

18 A intensificação da produção de CH<sub>4</sub> ocorre após a redução do NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e dos compostos de  
19 Mn<sup>+3</sup> e Mn<sup>+4</sup> e de Fe<sup>+3</sup> por bactérias anaeróbicas, o que leva cerca de 20 dias para ocorrer,  
20 dependendo das características do solo (SILVA et al., 2011). O aumento do potencial redox  
21 do solo e a expulsão do O<sub>2</sub> intensifica a formação de CH<sub>4</sub> pela mineralização da matéria  
22 orgânica presente no solo, o qual aumenta a disponibilidade de carbono lábil e serve de  
23 substrato para as bactérias metanogênicas (GAIHRE et al., 2013).

24 As irrigações contínuas e intermitentes apresentaram dois picos de emissões de CH<sub>4</sub>,  
25 sendo o primeiro aos 94 dias após a semeadura (DAS) na safra 2019/20 e aos 99 DAS na safra  
26 2020/21, correspondendo ao estágio de florescimento pleno do arroz irrigado (estádio R4),

1 com valores de 2,16 e 1,83 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e de 2,32 e 2,23 kg C-CH<sub>4</sub>  
2 ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2020/21 respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. O aumento  
3 da emissão de CH<sub>4</sub> durante a floração do arroz irrigado possivelmente está relacionado à  
4 liberação de grandes quantidades de exsudatos radiculares, decorrente da elevada atividade  
5 metabólica da planta nesse estágio de desenvolvimento da cultura, sendo que os mesmos  
6 atuam como substrato para os microrganismos metanogênicos, aumentando a produção de  
7 CH<sub>4</sub> (DAS & BARUAH, 2008).

8 O segundo pico de emissão de CH<sub>4</sub> foi verificado aos 109 DAS na safra 2019/20 e aos  
9 113 DAS na safra 2020/21, com valores de 2,88 e 2,31 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e  
10 de 2,65 e 2,45 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2020/21, para as irrigações contínua e intermitente,  
11 respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. O aumento da emissão de CH<sub>4</sub> ao  
12 final do período de cultivo pode estar relacionado à senescência das raízes do arroz e às suas  
13 escamações, processos esses que são intensificados na fase de maturação, favorecendo a  
14 atividade de bactérias metanogênicas e aumentando o fluxo de CH<sub>4</sub> no solo (AULAKH et al.,  
15 2000). Todavia, após o período reprodutivo, houve um decréscimo nas emissões C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>  
16 dia<sup>-1</sup> em ambos os sistemas de irrigação, o que está relacionado à diminuição da  
17 disponibilidade de C, da capacidade de transporte pelas raízes (GAIHRE et al., 2013) e  
18 supressão da irrigação, resultando no aumento gradativo das concentrações de O<sub>2</sub> no sistema.

19 Verificou-se que os fluxos de CH<sub>4</sub> não foram alterados com a intermitência da  
20 irrigação. Isso pode estar relacionado à intensidade da intermitência utilizada, pois a irrigação  
21 era retomada quando o solo não apresentava lâmina de água sobre a superfície, mas estava  
22 saturado. Nesse sentido, possivelmente as reações de oxirredução do solo e a disponibilidade  
23 de elétrons não tenham sido alteradas, promovendo a manutenção da comunidade microbiana  
24 metanogênica e das emissões de CH<sub>4</sub> do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por  
25 MORTELE et al. (2013), em que os autores também não observaram efeito da intermitência

1 da irrigação sobre a mitigação da emissão de CH<sub>4</sub> naquela safra agrícola em que o estudo foi  
2 realizado. Os autores relatam que eventos seguidos de chuva não permitiram a oxigenação do  
3 solo proporcionada pela intermitência da irrigação, fazendo com que o solo apresentasse  
4 condição eletroquímica semelhante à verificada nas parcelas com alagamento, condição esta  
5 que pode ter ocorrido no presente estudo, devido à intensidade da intermitência utilizada.

6 Em estudos realizados por ZSCHORNACK et al. (2016) e COWAN et al. (2021), os  
7 autores verificaram redução de 47% e 18% da emissão de CH<sub>4</sub> quando realizada a supressão  
8 da irrigação quando comparado à irrigação contínua. Todavia, ZSCHORNACK et al. (2016)  
9 realizaram a intermitência da irrigação entre os estádios V6 e V8 (16 dias sem lâmina de  
10 irrigação), enquanto que COWAN et al. (2021) realizaram a intermitência da irrigação ao  
11 longo de todo o período de cultivo do arroz, retomando a irrigação quando rachaduras finas se  
12 desenvolveram na superfície do solo; sendo a intensidade da intermitência utilizada diferente  
13 da realizada no presente estudo.

14 Quando realizado o cultivo do arroz em solo oxidado, pela irrigação por aspersão, não  
15 houve emissões significativas de CH<sub>4</sub>, pois a metanogênese requer condições anaeróbicas  
16 restritas, sendo procedida por microrganismos anaeróbios obrigatórios, que são sensíveis ao  
17 oxigênio (SILVA et al., 2008). Resultados semelhantes foram obtidos por FANGUEIRO et al.  
18 (2017), em que os autores também não verificaram emissão de CH<sub>4</sub> quando realizado o  
19 cultivo do arroz irrigado por aspersão, sendo o PAGp composto 100% por N<sub>2</sub>O.

20 As cultivares de arroz IRGA 424 RI e IRGA 431 CL apresentaram comportamento  
21 semelhante quanto aos fluxos de CH<sub>4</sub> do solo, com picos de emissão aos 94 e 109 DAS na  
22 safra 2019/20, com valores de 1,68 e 0,98 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> e 2,16 e 1,32 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>,  
23 respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si (Figura 2C). Na safra 2020/21, os  
24 picos de emissão ocorreram aos 99 e aos 113 DAS, com valores de 1,50 e 1,53 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>

1 dia<sup>-1</sup> e 1,74 e 1,65 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si  
2 (Figura 2D).

3 Com relação à emissão total de CH<sub>4</sub> do solo, as irrigações contínua e intermitente  
4 foram as que obtiveram os maiores valores, com médias de 167 e 162 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> na safra  
5 2019/20 (Figura 2E) e 184 e 173 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21 (Figura 2F) respectivamente,  
6 não diferindo estatisticamente entre si. A irrigação por aspersão foi eficiente na mitigação da  
7 emissão de CH<sub>4</sub> do solo, sendo o método de irrigação a apresentar os menores valores, com  
8 médias de 1,4 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e 1,6 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21. Em  
9 relação às cultivares, a IRGA 424 RI e IRGA 431 CL obtiveram médias de 114 e 106 kg C-  
10 CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20 (Figura 2E) e de 127 e 115 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21 (Figura  
11 2F), não diferindo estatisticamente entre si.

12 Em relação ao fluxo de N<sub>2</sub>O do solo, as emissões foram maiores na área cultivada com  
13 arroz irrigado por aspersão, comparativamente às irrigações contínua e intermitente. Os  
14 maiores fluxos de N<sub>2</sub>O do solo na área irrigada por aspersão ocorreram durante a fase inicial  
15 de avaliação (primeiros 45 dias), possivelmente devido às maiores concentrações de  
16 nitrogênio (N) no solo, decorrentes das adubações nitrogenadas realizadas. O maior fluxo de  
17 N<sub>2</sub>O do solo foi verificado após a adubação realizada no estádio V2/V3, aos 24 DAS na safra  
18 2019/20 (Figura 3A), com valor de 584 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> e aos 15 DAS na safra 2020/21  
19 (Figura 3B), com valor de 504 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Posteriormente, foram verificados mais  
20 dois picos de emissão ao longo do período de avaliação, os quais coincidem com a realização  
21 das adubações nitrogenadas nos estádios V6 e R0, com valores de 145 (44 DAS) e 96 (69  
22 DAS) g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e de 176 (41 DAS) e 119 (64 DAS) g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>  
23 dia<sup>-1</sup> na safra 2020/21, respectivamente. Os maiores fluxos de N<sub>2</sub>O do solo verificados pelo  
24 método de irrigação por aspersão possivelmente estão relacionados à alternância dos  
25 processos de umedecimento e secagem do solo, os quais, em condições aeróbicas, favorecem a

1 nitrificação do N do solo, sendo o mesmo utilizado por bactérias anaeróbicas facultativas  
2 responsáveis pelo processo de desnitrificação em condições de baixa disponibilidade de  
3 oxigênio (microsítios anaeróbios) (BAYER et al., 2012).

4 Nos métodos de irrigação contínua e intermitente foi verificada emissão de N<sub>2</sub>O  
5 apenas na primeira coleta após a adubação nitrogenada no estádio V3, com valores de 278 e  
6 290 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e de 241 e 236 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2020/21,  
7 respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. A manutenção da lâmina de água no  
8 cultivo irrigado por inundação cria condições estritamente anaeróbias, as quais restringem as  
9 emissões de N<sub>2</sub>O, de forma que os fluxos se aproximam de zero (LIU et al., 2010).

10 Ao realizar a intermitência da irrigação não foram verificadas emissões de N<sub>2</sub>O.  
11 Possivelmente a condição de saturação do solo não tenha possibilitado condições favoráveis à  
12 nitrificação do N do solo, não promovendo fluxos de N<sub>2</sub>O ao prevalecer a condição anaeróbia  
13 do solo com a retomada da irrigação. Assim como os resultados encontrados no presente  
14 estudo, RECTOR et al. (2018) também não observaram alteração do fluxo de N<sub>2</sub>O quando  
15 realizada a intermitência da irrigação.

16 As cultivares de arroz IRGA 424 RI e IRGA 431 CL apresentaram comportamento  
17 semelhante quanto aos fluxos de N<sub>2</sub>O do solo, apresentando um pico de emissão que coincide  
18 com a primeira adubação nitrogenada em cobertura realizada no estado V3, com valores de  
19 356 e 366 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2019/20 (Figura 3C) e de 325 e 332 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>  
20 na safra 2020/21 (Figura 3D), respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. Foram  
21 verificados mais dois picos de emissão aos 44 e 69 DAS na safra 2019/20 e aos 41 e 64 DAS  
22 na safra 2020/21, os quais coincidem com os estádios de realização da adubação nitrogenada  
23 em cobertura nos estádios V6 e R0, obtendo médias de 51 e 57 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra  
24 2019/20 e 69 e 52 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2020/21, para as cultivares IRGA 424 RI e  
25 IRGA 431 CL, respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si.

1 Com relação a emissão total de  $N_2O$  do solo, as irrigações contínua e intermitente  
2 obtiveram as menores médias, com valores de 2,9 e 3,5 kg N- $N_2O$  ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2019/20  
3 (Figura 3E) e 2,7 e 2,4 kg N- $N_2O$  ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2020/21 (Figura 3F), respectivamente, não  
4 diferindo estatisticamente entre si. Por ser um sistema em que a irrigação foi retomada quando  
5 o solo ainda estava saturado, a intermitência da irrigação não proporcionou condições  
6 favoráveis à ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação. Assim, possivelmente  
7 a maior parte das perdas de N do sistema tenham ocorrido na forma de  $N_2$ . Segundo HWANG  
8 et al. (2017), sob condições de alagamento, o  $N_2O$  presente no solo pode ser biologicamente  
9 reduzido a  $N_2$ , o que contribui, inclusive, para a mitigação das emissões de  $N_2O$ .

10 A irrigação por aspersão foi a que obteve a maior emissão total de  $N_2O$  do solo, com  
11 valor de 13,8 e 11,9 kg N- $N_2O$  ha<sup>-1</sup> nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. É provável  
12 que no sistema irrigado por aspersão tenha ocorrido uma alternância das condições de  
13 oxidação/redução do solo, favorecendo os processos de nitrificação e desnitrificação,  
14 intensificando a produção de  $N_2O$ , principalmente nos períodos após as adubações  
15 nitrogenadas em cobertura. Resultados semelhantes foram obtidos por FANGUEIRO et al.  
16 (2017), em que os autores também verificaram maior emissão total de  $N_2O$  do solo quando  
17 realizado o cultivo do arroz irrigado por aspersão quando comparado ao cultivo inundado.

18 Como alternativas para mitigar a emissão de  $N_2O$  do solo no cultivo irrigado por  
19 aspersão está o controle da lâmina de irrigação após a aplicação do fertilizante nitrogenado.  
20 Os estudos indicam que eventos de irrigação menos frequentes e de menor intensidade levam  
21 a menores emissões de  $N_2O$ , embora a quantidade dependa das condições edafoclimáticas de  
22 cultivo (SAPKOTA et al., 2020). Um mecanismo provável para essa tendência é que a  
23 aplicação menos intensa de água permite mais tempo para o oxigênio penetrar na matriz do  
24 solo entre os eventos de irrigação, o que favorece a nitrificação microbiana; quando o  
25 conteúdo de água do solo é baixo o suficiente, esses fatores levam à supressão de toda a

1 atividade microbiana do solo e, portanto, a uma diminuição geral na emissão de N<sub>2</sub>O (TROST  
2 et al., 2013).

3 Na cultura do milho irrigado por aspersão, GUARDIA et al. (2017), avaliando o efeito  
4 de inibidores da urease e estratégias de fertirrigação na mitigação das emissões de GEE,  
5 verificaram que a utilização da ureia com inibidor da urease reduziu em 51% a emissão de  
6 N<sub>2</sub>O, enquanto que a diluição da ureia via fertirrigação reduziu 78% a emissão de N<sub>2</sub>O. Nesse  
7 sentido, o uso da fertirrigação na cultura do arroz irrigado por aspersão e/ou a utilização de  
8 ureia com inibidor da urease podem ser alternativas para reduzir a emissão de N<sub>2</sub>O.

9 Em relação ao PAGp, os métodos de irrigação contínua e intermitente foram os que  
10 obtiveram as maiores médias, com valores de 5.463 e 5.474 kg CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20  
11 (Figura 4A) e de 4.839 e 4.480 kg CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21 (Figura 4B),  
12 respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. Verifica-se que 86% e 83% do PAGp  
13 dos métodos de irrigação contínua e intermitente na safra 2019/20 e 85% e 86% na safra  
14 2020/21 foi composto por CH<sub>4</sub>, respectivamente. A grande contribuição do CH<sub>4</sub> no PAGp em  
15 relação ao N<sub>2</sub>O foi observada em vários outros trabalhos (BAYER et al., 2015; CAMARGO  
16 et al., 2018; ZSCHORNACK et al., 2018).

17 O menor valor de PAGp foi obtido pela irrigação por aspersão, com média de 3.707  
18 kg CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e de 3.208 kg CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21, uma redução de  
19 32% e 31% em relação aos métodos de irrigação contínua e intermitente. Além de ter obtido o  
20 menor valor de PAGp, a irrigação por aspersão foi eficiente na mitigação da emissão de CH<sub>4</sub>,  
21 sendo o PAGp composto por 99% e de N<sub>2</sub>O em ambas as safras de realização do estudo.

22 Embora a irrigação por aspersão tenha proporcionado redução do PAGp, esse método  
23 obteve redução de 27% e 7% da produtividade de grãos nas safras 2019/20 e 2020/21, com  
24 médias de 9.094 e 10.548 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 4C e D), respectivamente. Isso está relacionado à  
25 presença de uma camada com elevado grau de compactação na camada de 0,05 – 0,10 m de

1 profundidade, o que limitou o crescimento de raízes em profundidade e reduziu a  
2 disponibilidade de água, a absorção de nutrientes e os parâmetros fotossintéticos da cultura  
3 (dados não apresentados). Além disso, as irrigações diárias associadas à manutenção do  
4 conteúdo volumétrico de água do solo para valores próximos à saturação na safra 2020/21,  
5 proporcionaram melhores condições de crescimento e desenvolvimento das plantas, reduzindo  
6 a diferença de produtividade quando comparado aos cultivos inundados.

7 As maiores produtividades de grãos foram obtidas pelas irrigações contínua e  
8 intermitente, as quais obtiveram médias de 12.337 e 12.440 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e de  
9 12.039 e 11.844 kg ha<sup>-1</sup> na safra agrícola de 2020/21, respectivamente, não diferindo  
10 estatisticamente entre si. Em relação às cultivares, as mesmas não diferiram quanto à  
11 produtividade de grãos, obtendo médias de 11.180 e 11.401 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e 11.334  
12 e 11.163 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21 para as cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431 CL,  
13 respectivamente.

14 Com base no índice que relaciona o potencial de aquecimento global parcial e a  
15 produtividade de grãos (PAGp/PG), verifica-se que na safra 2019/20 (Figura 4E) os métodos  
16 de irrigação e as cultivares não diferiram estatisticamente entre si, obtendo médias de 0,43,  
17 0,42 e 0,43 kg CO<sub>2</sub> eq. kg arroz<sup>-1</sup> para as irrigações por aspersão, contínua e intermitente e de  
18 0,43 e 0,43 kg CO<sub>2</sub> eq. kg arroz<sup>-1</sup> para as cultivares IRGA 424 RI e IRGA 431,  
19 respectivamente. Nesse sentido, embora a irrigação por aspersão tenha proporcionado um  
20 menor valor de PAGp, a redução do rendimento de grãos desse tratamento na safra 2019/20  
21 fez com que o seu PAGp/PG fosse equivalente ao obtido pelas irrigações contínua e  
22 intermitente. Todavia, ao se modificar a estratégia do manejo da irrigação na safra 2020/21  
23 (Figura 4F), obteve-se aumento da produtividade de grãos, resultando em um menor valor de  
24 PAGp/PG quando comparado às irrigações contínua e intermitente, sendo seus valores de  
25 0,30, 0,42 e 0,40 kg CO<sub>2</sub> eq. kg arroz<sup>-1</sup>, respectivamente. Quanto às cultivares, não foi

1 verificada diferença estatística quanto ao valor de PAGp/PG para a IRGA 424 RI e IRGA 431  
2 CL, as quais obtiveram médias de 0,42 e 0,43 kg CO<sub>2</sub> eq. kg arroz<sup>-1</sup> na safra 2019/20 e de  
3 0,36 e 0,38 kg CO<sub>2</sub> eq. kg arroz<sup>-1</sup> na safra 2020/21, respectivamente.

4

## 5 **CONCLUSÃO**

6 O método de irrigação por aspersão promove a mitigação da emissão de metano no  
7 solo em cultivo de arroz, porém, potencializa as emissões de óxido nitroso. Ainda assim, esse  
8 método pode ser considerado eficiente quanto à redução do potencial de aquecimento global  
9 parcial quando comparado ao cultivo do arroz irrigado por inundação, desde que não ocorra  
10 redução significativa da produtividade de grãos.

11 No cultivo do arroz irrigado por inundação, as emissões de gases de efeito estufa  
12 ocorrem predominantemente na forma de metano. Devido à intensidade da intermitência  
13 utilizada, não foi verificada redução da emissão de metano, bem como aumento da emissão de  
14 óxido nitroso com a retomada da irrigação. Assim, o potencial de aquecimento global parcial  
15 não foi influenciado, sendo o PAGp/PG da irrigação intermitente semelhante à irrigação  
16 contínua.

17 As cultivares de arroz irrigado IRGA 424 RI e IRGA 431 CL não influenciaram os  
18 fluxos e a emissão total de metano e óxido nitroso, bem como o potencial de aquecimento  
19 global parcial e a produtividade de grãos, contendo valores semelhantes de PAGp/PG.

20

## 21 **AGRADECIMENTOS**

22 Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela  
23 bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor e pela bolsa de produtividade em pesquisa ao  
24 segundo autor.

25

## 1 **DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES**

2 Os autores declaram não haver conflito de interesses.

3

## 4 **CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES**

5 Os autores contribuíram igualmente para o manuscrito.

6

## 7 **REFERÊNCIAS**

8 AULAKH, M. S. et al. Pattern and amount of aerenchyma relate to variable methane transport  
9 capacity of different rice cultivars. **Plant Biology**, v. 2, n. 02, p. 182-194, 2000. Disponível  
10 em: <<https://doi.org/10.1055/s-2000-9161>>. Acesso em: Fev. 7, 2021. doi: 10.1055/s-2000-  
11 9161

12 AVILA, L. A. et al. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent  
13 irrigation. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p.442-448, 2015. Disponível em:  
14 <<https://doi.org/10.2134/agronj14.0080>>. Acesso em: Mar. 18, 2021. doi:  
15 10.2134/agronj14.0080.

16 BAYER, C. et al. A seven-year study on the effects of fall soil tillage on yield-scaled  
17 greenhouse gas emission from flood irrigated rice in a humid subtropical climate. **Soil and**  
18 **Tillage Research**, v. 145, p. 118-125, 2015. Disponível em:  
19 <<https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.001>>. Acesso em: Fev. 18, 2021. doi:  
20 10.1016/j.still.2014.09.001

21 BAYER, C. et al. Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems. **Soil &**  
22 **Tillage Research**. v.124, p. 1-7, 2012. Disponível em:  
23 <<https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.006>>. Acesso em: Ago. 28, 2021. doi:  
24 10.1016/j.still.2012.03.006

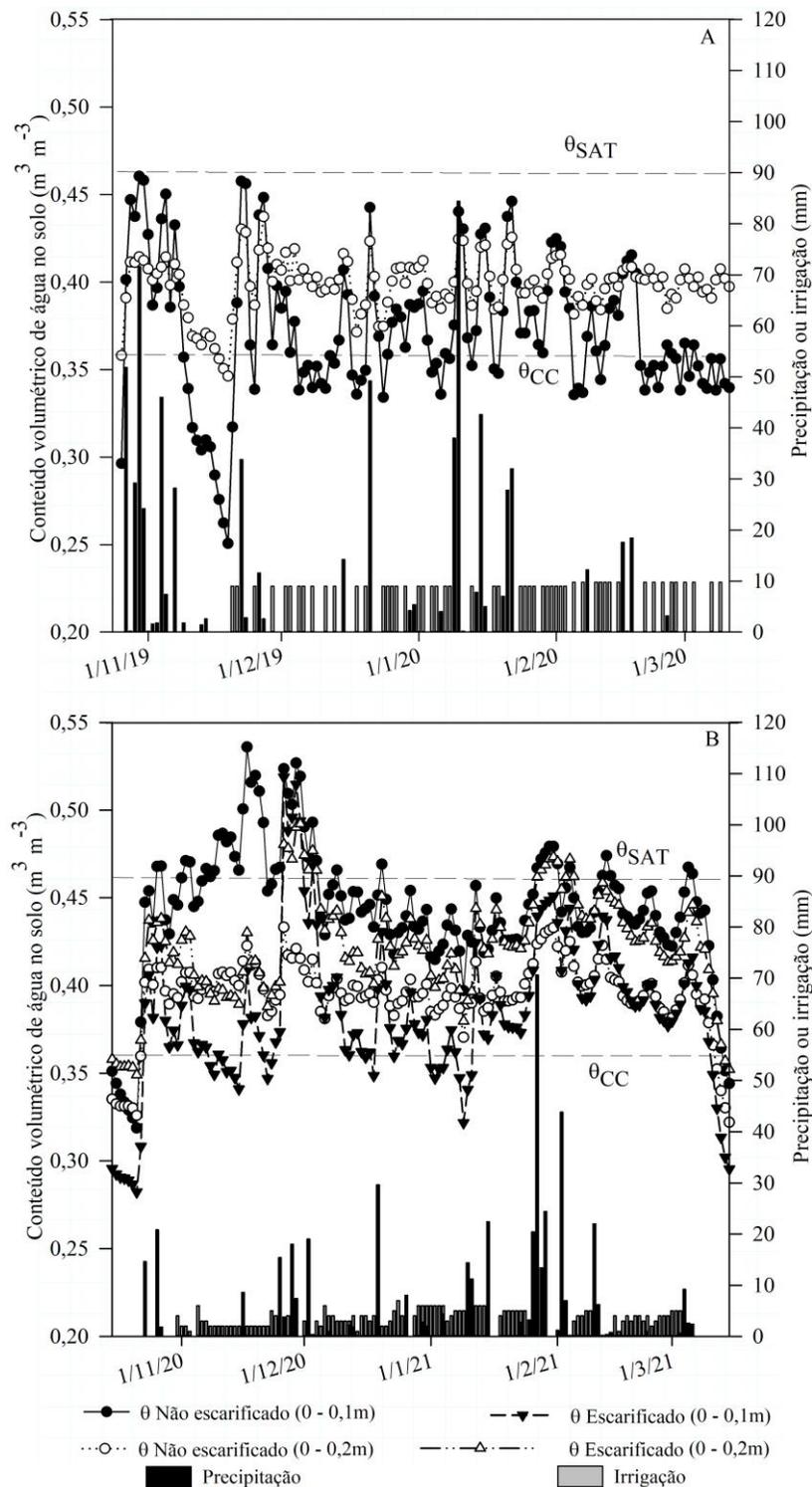
- 1 CAMARGO, E. S. et al. Intercontinental comparison of greenhouse gas emissions from  
2 irrigated rice fields under feasible water management practices: Brazil and Japan. **Soil**  
3 **Science and Plant Nutrition**, v. 64, n. 1, p. 59-67, 2018. Disponível em:  
4 <<https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1415660>>. Acesso em: Jun. 24, 2021. doi:  
5 10.1080/00380768.2017.1415660
- 6 CARRACELAS, G. et al. Irrigation management strategies to increase water productivity in  
7 *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. **Agricultural Water Management**, v. 222, p.161-172, 2019.  
8 Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.049>>. Acesso em: Jul. 10, 2021.  
9 doi: 10.1016/j.agwat.2019.05.049.
- 10 COUNCE, P. A. et al. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice  
11 development. **Crop Science**, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000. Disponível em:  
12 <<https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>>. Acesso em: Fev. 13, 2021. doi:  
13 10.2135/cropsci2000.402436x.
- 14 COWAN, Nicholas et al. Experimental comparison of continuous and intermittent flooding of  
15 rice in relation to methane, nitrous oxide and ammonia emissions and the implications for  
16 nitrogen use efficiency and yield. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 319, p.  
17 107571, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107571>>. Acesso em: Abr.  
18 19, 2021. doi: 10.1016/j.agee.2021.107571
- 19 DAS, K.; BARUAH, K. K. A comparison of growth and photosynthetic characteristics of two  
20 improved rice cultivars on methane emission from rainfed agroecosystem of northeast India.  
21 **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 124, n. 1-2, p. 105-113, 2008. Disponível em:  
22 <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.09.007>>. Acesso em: Jul. 14, 2021. doi:  
23 10.1016/j.agee.2007.09.007
- 24 FANGUEIRO, D. et al. Effect of tillage and water management on GHG emissions from  
25 Mediterranean rice growing ecosystems. **Atmospheric Environment**, v. 150, p. 303-312,

- 1 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.020>>. Acesso em: Ago.  
2 21, 2021. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.11.020
- 3 GOMES, J. et al. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under  
4 subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 1, p. 36-44, 2009. Disponível em:  
5 <<https://doi.org/10.1016/j.still.2009.10.001>>. Acesso em: Set. 17, 2021. doi:  
6 10.1080/00380768.2017.1415660
- 7 GUARDIA, G. et al. Effect of inhibitors and fertigation strategies on GHG emissions, NO  
8 fluxes and yield in irrigated maize. **Field crops research**, v. 204, p. 135-145, 2017.  
9 Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.009>>. Acesso em: Jul. 27, 2021. doi:  
10 10.1007/s13593-013-0134-0
- 11 HWANG, H. Y. et al. Effect of cover cropping on the net global warming potential of rice  
12 paddy soil. **Geoderma**, v. 292, 2017. Disponível em:  
13 <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.001>>. Acesso em: Set. 20, 2021. doi:  
14 10.1016/j.geoderma.2017.01.001.
- 15 IPCC. **Climate change 2014**. Contribution of working groups I. II and III to the fifth  
16 assessment report of the intergovernmental panel on climate change, v. 151, n. 10.1017,  
17 2014.
- 18 LIU, S. et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N<sub>2</sub>O  
19 emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. **Science of the**  
20 **Total Environment**, v. 408, p. 906-913, 2010. Disponível em:  
21 <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.002>>. Acesso em: Ago. 18, 2021. doi:  
22 10.1016/j.scitotenv.2009.11.002
- 23 MASSEY, J. H. et al. Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice  
24 irrigation in Mississippi. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 297–304, 2014.  
25 Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.023>>. Acesso em: Set. 21, 2021.

- 1 doi: 10.1016/j.agwat.2014.08.023.
- 2 MOSIER, A. R. Chamber and isotope techniques. **Exchange of trace gases between**  
3 **terrestrial ecosystem and the atmosphere**, p. 175-187, 1989.
- 4 MOTERLE, D. F. et al. Methane efflux in rice paddy field under different irrigation  
5 managements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 431-437, 2013. Disponível  
6 em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200014>>. Acesso em: Abr. 20, 2021. doi:  
7 10.1590/S0100-06832013000200014
- 8 PETERS, V.; CONRAD, R. Sequential reduction processes and initiation of CH<sub>4</sub> production  
9 upon flooding of oxic upland soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 28, n. 3, p. 371-382,  
10 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00146-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00146-8)>. Acesso em: Jun. 24,  
11 2021. doi: 10.1016/0038-0717(95)00146-8
- 12 PINTO, M. A. B. et al. Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as  
13 a function of water availability in different phenological phases. **Field Crops Research**, v.  
14 248, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107714>>. Acesso em: Jul. 23,  
15 2021. doi: 10.1016/j.fcr.2020.107714.
- 16 RECTOR, C. et al. N<sub>2</sub>O emissions and global warming potential as affected by water  
17 management and rice cultivar on an Alfisol in Arkansas, USA. **Geoderma Regional**, v. 14, p.  
18 e00170, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00170>>. Acesso em:  
19 Mar. 11, 2021. doi: 10.1016/j.geodrs.2018.e00170
- 20 SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed. Brasília, DF:  
21 Embrapa, 2018. 356p.
- 22 SAPKOTA, Anish et al. Irrigation and greenhouse gas emissions: a review of field-based  
23 studies. **Soil Systems**, v. 4, n. 2, p. 20, 2020. Disponível em:  
24 <<https://doi.org/10.3390/soilsystems4020020>>. Acesso em: Fev. 7, 2021. doi:  
25 10.3390/soilsystems4020020

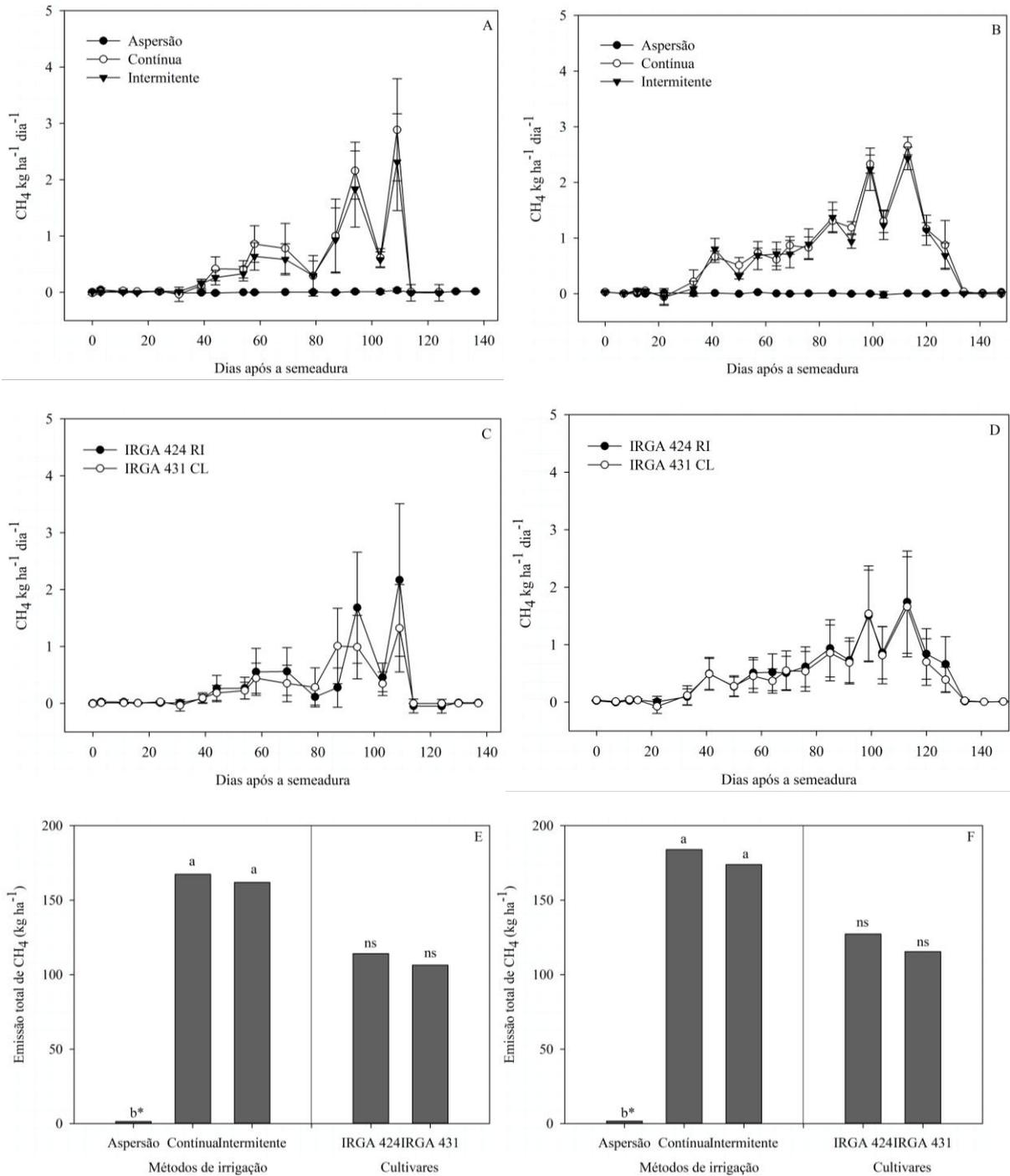
- 1 SILVA, L. S. da et al. Dinâmica da emissão de metano em solos sob cultivo de arroz irrigado  
2 no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 473-781, 2011. Disponível  
3 em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200016>>. Acesso em: Fev. 7, 2021. doi:  
4 10.1590/S0100-06832011000200016
- 5 SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes  
6 alagados. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O.  
7 **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. Cap. 27, p.  
8 525-544.
- 9 SIMMONDS, M. B. et al. Seasonal methane and nitrous oxide emissions of several rice  
10 cultivars in direct-seeded systems. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, n. 1, p. 103-  
11 114, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2014.07.0286>>. Acesso em: Fev. 7,  
12 2021. doi: 10.2134/jeq2014.07.0286
- 13 SOSBAI. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Rio  
14 grande do Sul: Farroupilha. 2018. 209p.
- 15 GAIHRE, Y.K. et al. Impact of elevated temperatures on greenhouse gas emissions in  
16 rice systems: interaction with straw incorporation studied in a growth chamber  
17 experiment. **Plant Soil**, v. 373, n.1, p. 857–875, 2013. Disponível em:  
18 <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1852-4>>. Acesso em: Ago. 28, 2021. doi:  
19 10.1007/s11104-013-1852-4
- 20 TROST, B. et al. Irrigation, soil organic carbon and N<sub>2</sub>O emissions. A review. **Agronomy for**  
21 **Sustainable Development**, v. 33, n. 4, p. 733-749, 2013. Disponível em:  
22 <<https://doi.org/10.1007/s13593-013-0134-0>>. Acesso em: Jul. 25, 2021. doi:  
23 10.1007/s13593-013-0134-0
- 24 ZSCHORNACK, T. et al. Impacto de plantas de cobertura e da drenagem do solo nas  
25 emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O sob cultivo de arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.

1 51, p. 1163-1171, 2016. Disponível em: <[https://doi.org/10.1590/S0100-](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900016)  
2 [204X2016000900016](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900016)>. Acesso em: Fev. 7, 2021. doi: 10.1590/S0100-204X2016000900016  
3 ZSCHORNACK, T. et al. Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions in subtropical  
4 paddy rice under alternative irrigation systems. **Nutrient cycling in agroecosystems**, v. 105,  
5 n. 1, p. 61-73, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10705-016-9775-0>>. Acesso  
6 em: Set. 8, 2021. doi: 10.1007/s10705-016-9775-0  
7  
8



1

2 Figura 1 - Conteúdo volumétrico de água no solo no método de irrigação por aspersão  
 3 cultivado com arroz nas safras agrícolas 2019/20 (A) e 2020/21 (B).  $\theta_{\text{SAT}}$  = Conteúdo  
 4 volumétrico de água no solo na saturação.  $\theta_{\text{CC}}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na  
 5 capacidade de campo.



4 Figura 2 – Fluxo médio diário (A, B, C e D), emissão acumulada de CH<sub>4</sub> do solo sob métodos  
5 de irrigação e cultivares de arroz irrigado (E e F) nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2020/21 (B,  
6 D e F). As barras de erro representam o intervalo de confiança a 5% de significância. Letras  
7 iguais nas barras não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância. Santa  
8 Maria, RS, 2021.

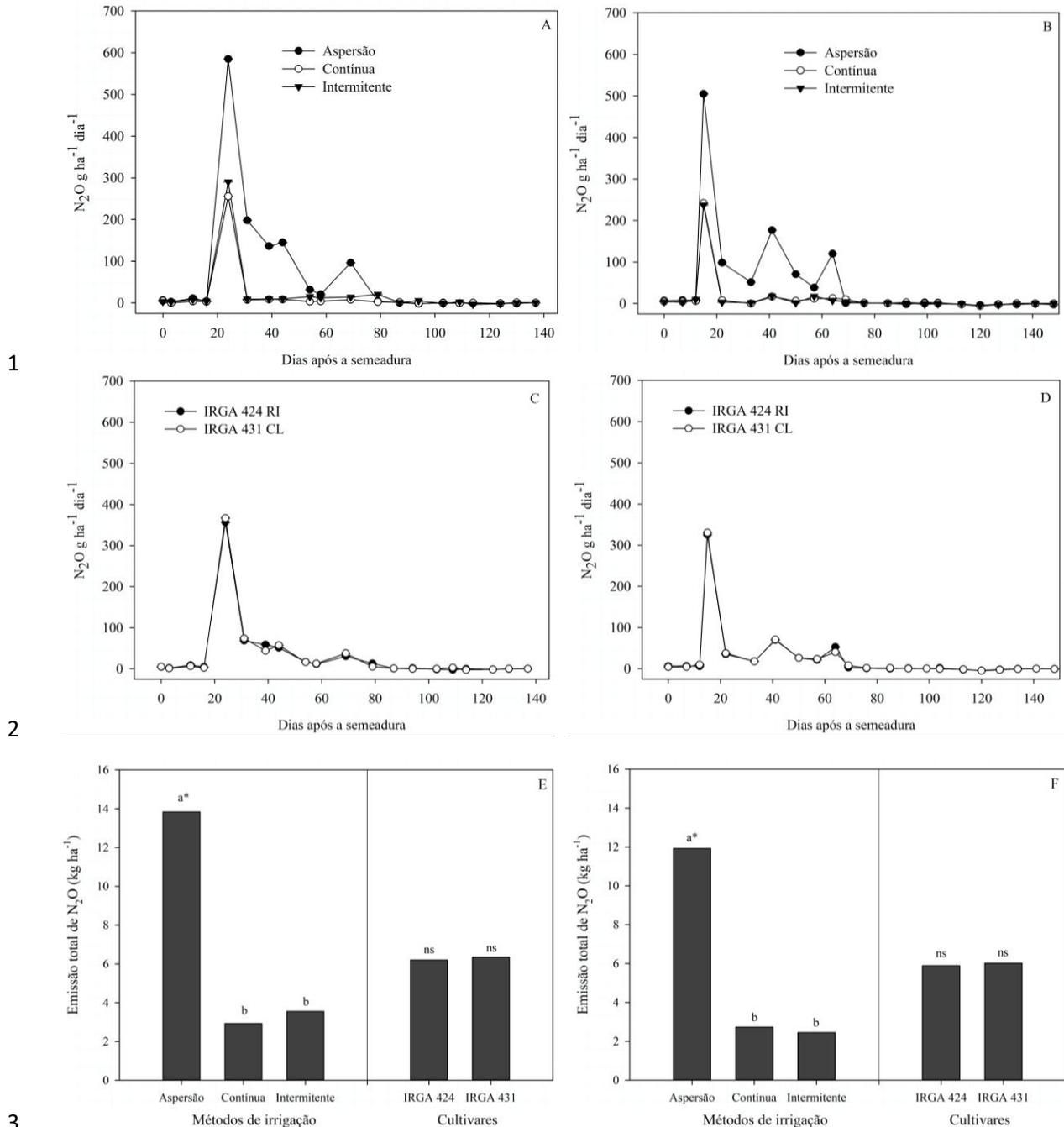
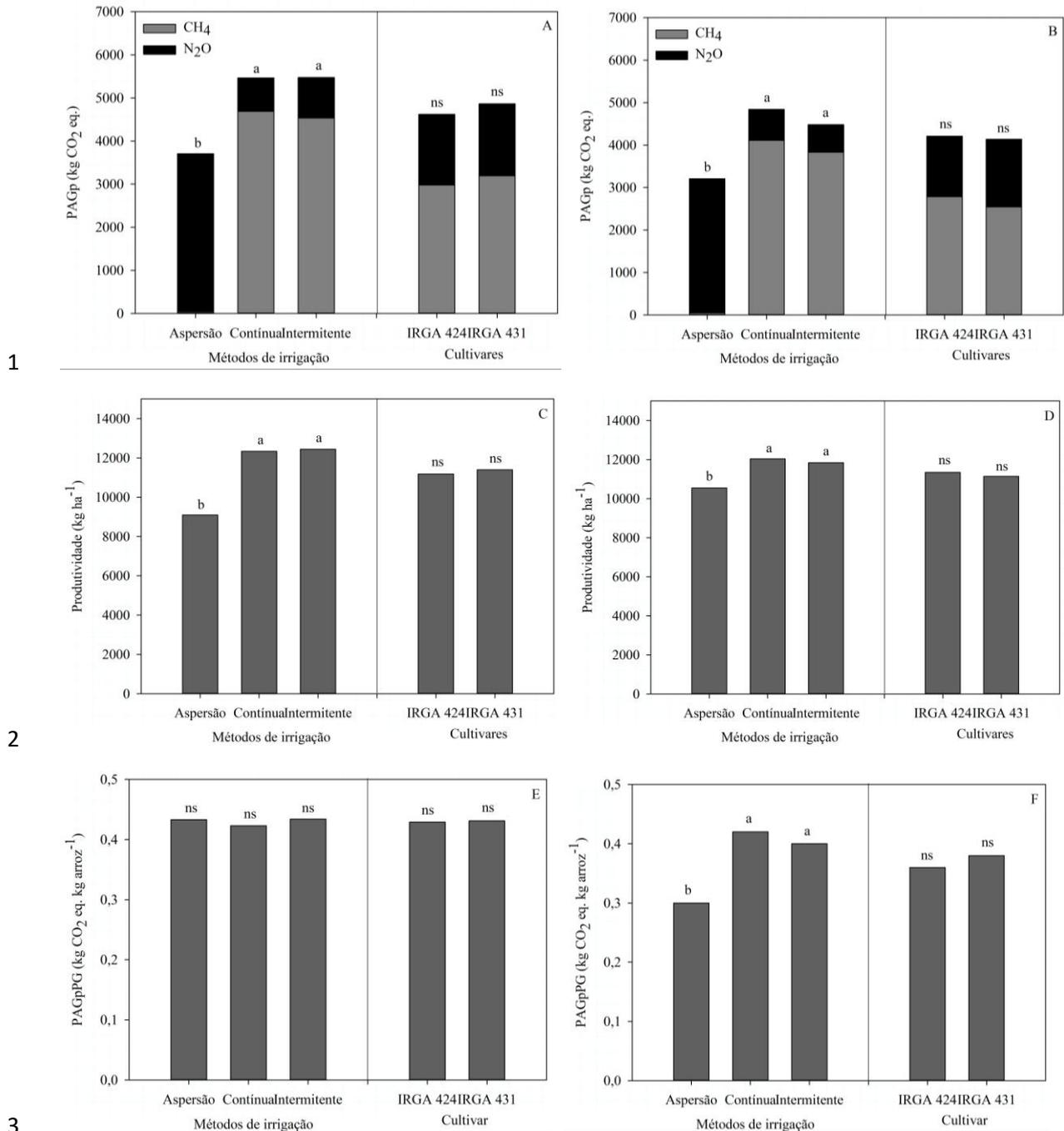


Figura 3 – Fluxo médio diário (A, B, C e D), emissão acumulada de  $N_2O$  do solo sob métodos de irrigação e cultivares de arroz irrigado (E e F) nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2020/21 (B, D e F). As barras de erro representam o intervalo de confiança a 5% de significância. Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância. Santa Maria, RS, 2021.



4 Figura 4 – Potencial de aquecimento global parcial (A e B), produtividade (C e D) e índice  
5 PAGp/GP de métodos de irrigação e cultivares de arroz nas safras 2019/20 (A, C e E) e  
6 2020/21 (B, D e F) em Santa Maria, RS. Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo  
7 teste de Scott Knott a 5% de significância. <sup>ns</sup> Não significativo. Santa Maria, RS. 2021.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados verificados no presente estudo apontam que o método de irrigação por superfície via inundação contínua promove maior uso de água e menor produtividade da água de irrigação. Nesse sentido, métodos alternativos de irrigação, como a irrigação por superfície via inundação intermitente, proporcionou redução de 25% do uso de água quando comparado a irrigação contínua, sem prejuízo aos parâmetros morfofisiológicos da planta e a produtividade de grãos. Além disso, a qualidade de grãos não foi influenciada, proporcionando características físicas dos grãos de arroz semelhantes as obtidas quando realizada a irrigação sob inundação contínua. Devido a intensidade da intermitência utilizada, não foi verificada redução da emissão de CH<sub>4</sub>, bem como do aumento da emissão de N<sub>2</sub>O com a retomada da irrigação. Assim, o potencial de aquecimento global parcial não foi influenciado, sendo o PAGp/PG da irrigação intermitente semelhante à irrigação contínua.

O método de irrigação por aspersão também foi eficiente na economia do uso de água para irrigação, com redução de 44% quando comparado a irrigação contínua. Todavia, a presença de impedimentos físicos em subsuperfície (camada de 5 a 10 cm) limitou o crescimento de raízes em profundidade, reduzindo a capacidade de absorção de água pelas plantas. A depleção do conteúdo volumétrico de água do solo até a capacidade de campo prejudicou o desenvolvimento de plantas, reduzindo o acúmulo de matéria seca da parte aérea e de raiz e dos parâmetros relacionados à fotossíntese, resultando na redução de 26% da produtividade de grãos quando comparado ao cultivo inundado. No entanto, quando realizada a manutenção do conteúdo volumétrico de água no solo em valores próximos a saturação, obteve-se incremento de 14% sobre a produtividade de grãos. Todavia, o maior acréscimo em produtividade foi obtido quando se realizou a escarificação do solo associada a manutenção do conteúdo volumétrico de água próximo a saturação (porosidade total), com acréscimo de 19% quando comparado a escarificação associada a depleção do conteúdo volumétrico de água até a capacidade de campo.

Assim, fica evidente a necessidade de correção dos impedimentos físicos do solo para o cultivo do arroz irrigado por aspersão em ambientes de terras baixas. O reduzido perfil de solo explorado pelas raízes limita a capacidade de absorção de água do solo, fazendo com que a necessidade de irrigação para a cultura do arroz irrigado seja diária, a fim de repor o conteúdo de água perdido por evapotranspiração. Quando realizada a escarificação do solo, a capacidade de água disponível aumentou em 55%, possibilitando melhores condições de

crescimento e desenvolvimento das plantas, principalmente em períodos de elevada demanda evapotranspirativa.

Quanto a nutrição vegetal, verificou-se que as plantas irrigadas por aspersão apresentaram menor acúmulo de nutrientes no tecido da parte aérea quando comparado ao cultivo inundado. Todavia, quando realizado a escarificação do solo, associado ao aumento do conteúdo volumétrico de água do solo se obteve incremento do acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas, todavia, ainda inferior ao verificado no cultivo inundado. Além da limitação de ordem física, a qual restringe o crescimento de raízes em camada subsuperficiais do solo, a disponibilidade de nutrientes em solo oxidado é menor do que quando comparada ao cultivo em solo alagado. Nesse sentido, há a necessidade de calibração dos níveis de adubação para as cultivares tradicionalmente utilizadas no cultivo inundado quando realizado o seu cultivo sob irrigação por aspersão.

Quanto à qualidade de grãos de arroz irrigados por aspersão, verificou-se que houve redução da percentagem de grãos inteiros e aumento de grãos opacos e gessados. Todavia, ao realizar o cultivo em solo escarificado obteve-se redução dos parâmetros qualitativos dos grãos e maior percentual de grãos inteiros, no entanto, com valores ainda inferiores aos obtidos no cultivo inundado.

Além da redução do uso de água para irrigação, a aspersão se mostrou eficiente na mitigação da emissão de metano no solo, porém, potencializou as emissões de óxido nitroso. Ainda assim, esse método pode ser considerado eficiente quanto à redução do potencial de aquecimento global parcial quando comparado ao cultivo do arroz irrigado por inundação, desde que não ocorra redução da produtividade de grãos.

Quanto as cultivares de arroz irrigado, o menor ciclo do IRGA 431 CL proporcionou redução do uso de água e maior produtividade da água de irrigação, sem prejuízo a produtividade de grãos da cultura. Além disso, a IRGA 431 CL obteve menor percentual de grãos opacos e gessados e maior rendimento de grãos inteiros quando comparado a IRGA 424 RI. Em relação a emissão de gases de efeito estufa, os fluxos e a emissão total de metano e óxido nitroso, bem como o potencial de aquecimento global parcial não foram influenciados pelas cultivares de arroz irrigado, contendo valores semelhantes de PAGp/PG.