

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**

**Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel**

**Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água**



Dissertação

**Adubação nitrogenada, fosfatada e emissões de metano e óxido nitroso na cultura do arroz irrigado por sulco.**

**Pâmela Andrades Timm**

Pelotas, 2022

**Pâmela Andrades Timm**

**Adubação nitrogenada, fosfatada e emissões de metano e óxido nitroso na cultura do arroz irrigado por sulco.**

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

Orientador: Dr. Filipe Selau Carlos

Coorientadores: Dr. José Maria Barbat Parfitt e Dra. Walkyria Bueno Scivittaro

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

T584a Timm, Pâmela Andrades

Adubação nitrogenada, fosfatada e emissões de metano e óxido nitroso na cultura do arroz irrigado por sulco. / Pâmela Andrades Timm ; Filipe Selau Carlos, orientador ; Walkyria Bueno Scivittaro, José Maria BarbatParfitt, coorientadores. — Pelotas, 2022. 75f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade deAgronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. *Oryza sativa* L.. 2. Fósforo. 3. Nitrogênio. 4. Gases deefeito estufa. 5. Mitigação. I. Carlos, Filipe Selau, orient. II. Scivittaro, Walkyria Bueno, coorient. III. Parfitt, José Maria Barbat, coorient. Scivittaro, Walkyrua Bueno. IV. Título.

CDD : 633.18

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB:10/1842

Pâmela Andrades Timm

Adubação nitrogenada, fosfatada e emissões de metano e óxido nitroso na cultura do arroz irrigado por sulco.

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

Data da defesa: 25 de fevereiro de 2022

Banca examinadora:

---

Professor Dr. Filipe Selau Carlos (Orientador). Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Professor Dr. Leandro Souza da Silva. Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Professor Dr. Rogerio Oliveira de Souza. Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Dedico este trabalho a  
meus pais, meu marido e  
ao meu dindo (in  
memoriam)**

## **Agradecimentos**

A Deus, pela minha vida, saúde e determinação para não desanimar e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus pais Rosimara e Carlos, pela vida e por me incentivarem nos momentos difíceis e compreenderem a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Ao meu marido Adriano, por ter caminhado ao meu lado, pela sua paciência, compreensão e ajuda prestada durante a elaboração da presente dissertação, especialmente por apresentar sempre um sorriso, quando sacrificava os dias, as noites, os finais-de-semana e os feriados em prol da realização deste estudo.

A todos familiares, pela torcida e apoio de sempre.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

À Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, e toda sua equipe, que auxiliaram na realização do mestrado.

A empresa Ricetec, por ceder a área experimental, ao Engenheiro Agrônomo Cyrano Busato, pela parceria, ajuda e contribuições realizada ao longo do desenvolvimento do projeto, e aos funcionários dessa empresa, que não mediram esforços em me ajudar.

A Embrapa Clima Temperado, pelo suporte de materiais e tudo que foi solicitado.

A todos os professores que ao longo da minha trajetória contribuíram para que chegasse até aqui, sem eles nada disso seria possível.

A Alexssandra, que foi incansável me ajudando em todos os momentos em meio a uma pandemia, ela foi meu braço esquerdo com toda certeza. Essa não é apenas uma conquista minha, mas também de quem esteve do meu lado. Sua ajuda foi essencial para que concretizasse meu objetivo. Jamais esquecerei que foi você que esteve do meu lado me dando forças e me motivando para nunca desistir. Agradeço-a muito por toda ajuda.

Ao Pablo, por ser esse amigo atencioso, prestativo, com uma energia incrível, que apesar de pouco tempo, tem um cantinho muito especial no meu coração.

Aos colaboradores, bolsistas de iniciação científica do FertSOil e da Embrapa, pelo convívio e ajuda na execução dos experimentos. Da mesma forma, aos funcionários do Departamento de Solos e da Embrapa Clima Temperado.

Aos Pós-graduandos do PPG MACSA, que me auxiliaram na condução de análises.

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

Ao professor Dr. Filipe Selau Carlos, pelo apoio contínuo ao meu estudo, por sua paciência, motivação e imenso conhecimento.

À Dr<sup>a</sup> Walkyria Bueno Scivittaro, pela coorientação, ensinamentos, incentivo e pelo apoio e por ter aceitado acompanhar-me neste projeto. O seu empenho foi essencial para a minha motivação à medida que as dificuldades iam surgindo ao longo do percurso.

Ao pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Dr. José Maria Barbat Parfitt, que foi o principal incentivador desde o início da graduação para que eu realizasse a pós-graduação, pelo incentivo e ensinamentos, que levarei para toda a vida.

Ao meu dindo Elbio (in memoriam), que já se foi, que se faz presente em todos os dias da minha vida. Sei que, de algum lugar, ele olha por mim.

## Resumo

TIMM, Pâmela Andrades. **Adubação nitrogenada, fosfatada e emissões de metano e óxido nítrico na cultura do arroz irrigado por sulco**. 2022. 75p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

O cultivo da soja em terras baixas proporciona melhoria em atributos químicos e microbiológicos do solo; contudo, uma das principais limitações para o cultivo da leguminosa neste ambiente é o excesso hídrico. Dessa maneira, uma alternativa viável para ambas as culturas é a utilização do sistema sulco-camalhão, que proporciona uniformidade e elevado desempenho da cultura da soja, evitando excessos hídricos e morte de plantas. Posteriormente, não haverá formação de lâmina de água uniforme no cultivo do arroz irrigado no sistema sulco-camalhão e isso impacta na condição redox do solo e a dinâmica e disponibilidade de nutrientes no solo, de maneira particular o nitrogênio e o fósforo. Além do impacto na disponibilidade de nutrientes, a variação nas condições redox do solo ao longo do comprimento do sulco de irrigação do arroz deve promover variações no potencial de emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ) e intensificar os processos de nitrificação e desnitrificação, que têm o óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) como produto intermediário. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar a volatilização de amônia, os componentes de rendimento, emissão de metano e óxido nítrico e produtividade de grãos do arroz irrigado em sistema sulco-camalhão em rotação à cultura da soja sob níveis de nitrogênio e fósforo. O experimento foi realizado sob condições de campo na Estação Experimental da Ricetec, safra 2020/21 em Capão do Leão, RS, aproveitando a infraestrutura de sulcos e camalhões estabelecida para a soja cultivada em rotação na safra anterior. Foi utilizado um híbrido de arroz XP117 RiceTec com ciclo de 130 dias. O experimento consistiu em um fatorial duplo 3 x 4, onde fator 1 consistiu na porção ao longo dos sulcos de irrigação (superior, intermediária e inferior) e o fator 2, a dose de N (0, 60, 120 e 180  $\text{kg ha}^{-1}$ ) e  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0, 30, 60, 120  $\text{kg ha}^{-1}$ ) para a cultura de arroz irrigado. O arroz irrigado por sulco é mais responsivo à adubação nitrogenada na porção inferior do sulco e pouco responsivo ao fósforo devido à maior disponibilidade do nutriente no solo, pelo sistema estar altamente alagado, com baixa emissão de oxigênio. A emissão total de  $\text{N}_2\text{O}$  associada ao cultivo de arroz é maior na porção superior da lavoura, contrariamente a emissão de  $\text{CH}_4$  é maior na porção inferior da lavoura, onde o solo é mantido inundado. Dessa forma, a irrigação por sulco reduz a emissão de gases de efeito estufa, constituindo de alternativa promissora para reduzir o potencial de aquecimento global (PAG) parcial em sistemas de produção do arroz no Sul do Brasil.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L.. Nitrogênio. Fósforo. Adubo. Eficiência. Produtividade. Gás de efeito estufa. Mitigação.

## Abstract

TIMM, Pamela Andrades. **Nitrogen and phosphate fertilization and methane and nitrous oxide emissions in furrow irrigated rice.** 2022. 75p. Dissertation (Master of Science) – Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2022.

Soybean cultivation in lowlands provides improvement in soil chemical and microbiological attributes, however, one of the main limitations for legume cultivation in this environment is water excess. Thus, a viable alternative for both crops is the use of the furrow-ridge system, which provides uniformity and high performance of the soybean crop, avoiding water excesses and plant death. Subsequently, the cultivation of irrigated rice in the furrow-ridge system will not form a uniform water depth and this impacts the redox condition of the soil and the dynamics and availability of nutrients in the soil, in particular nitrogen and phosphorus. In addition to the impact on nutrient availability, the variation in soil redox conditions along the length of the rice irrigation furrow should promote variations in the potential for methane (CH<sub>4</sub>) emissions and intensify the nitrification and denitrification processes, which have the oxide nitrous (N<sub>2</sub>O) as an intermediate product. Thus, the objective of this work was to evaluate ammonia volatilization, yield components, methane and nitrous oxide emission and grain yield of irrigated rice in a furrow-ridge system in rotation with soybean under nitrogen and phosphorus levels. The experiment was carried out under field conditions at the Ricetec Experimental Station, crop 2020/21 in Capão do Leão, RS, taking advantage of the furrows and ridges infrastructure established for soybeans cultivated in rotation in the previous season. A rice hybrid XP117 RiceTec with a cycle of 130 days was used. The experiment consisted of a 3 x 4 double factorial, where factor 1 consisted of the portion of the along the irrigation furrows (upper, intermediate and lower) and factor 2, the dose of N (0, 60, 120 and 180 kg ha<sup>-1</sup>) and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0, 30, 60, 120 kg ha<sup>-1</sup>) for irrigated rice. Furrow irrigated rice is more responsive to nitrogen fertilization in the lower portion of the furrow and less responsive to phosphorus due to the greater availability of the nutrient in the soil. The total N<sub>2</sub>O emission associated with rice cultivation is higher in the upper portion of the crop, in contrast, the CH<sub>4</sub> emission is higher in the lower portion of the crop, where the soil is kept flooded. Thus, furrow irrigation reduces the emission of greenhouse gases, constituting a promising alternative to reduce the partial Global Warming Potential in rice production systems in southern Brazil.

Keywords: *Oryza sativa* L.. Nitrogen. Phosphorus. Fertilizer. Efficiency. Productivity. Greenhouse gas. Mitigation.

## Lista de Figuras

Figura 1	Ciclo do nitrogênio e principais perdas em solos agrícolas.....	24
Figura 2	Vista aérea da área experimental cultivada com arroz irrigado por sulco (fase de estabelecimento do sulco).....	27
Figura 3	Vista geral da área experimental cultivada com soja em sistema sulco-camalhão na safra 2019/2020.....	28
Figura 4	Vista de área cultivada com a cultivar de arroz irrigado XP117, da RiceTec, em Capão do Leão-RS.....	29
Figura 5	Ilustração transversal do sistema sulco-camalhão nas porções inferior, intermediária e superior. Dimensões de 150 m e declividade de 0,1%.....	30
Figura 6	Arroz irrigado por sulco, utilizando politubos.....	32
Figura 7	Precipitação acumulada (mm) durante o ciclo da cultura do arroz, na Estação experimental da RiceTec. Capão do Leão-Rs. Safra 2020/2021.....	32
Figura 8	Vista da área experimental estabelecida em sistema sulco-camalhão, previamente à semeadura do arroz irrigado.....	33
Figura 9	Sistema coletores de amostras de gases de efeito estufa do tipo câmara estática fechada.....	36
Figura 10	Coletores de PVC para determinar as perdas de amônia volatilizada.....	39
Figura 11	Produtividade de grãos de arroz irrigado por sulco sob doses de nitrogênio em híbrido de arroz XP 117 em rotação com soja. Estação Experimental RiceTec, Capão do Leão-RS. Bandas indicam o intervalo de confiança a nível de 95% de confiança. Sulcos com 150 m de comprimento e declividade de 0,1 %. Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente).....	43
Figura 12	Altura de arroz irrigado em sistema sulco-camalhão, em rotação com soja, sob diferentes doses de nitrogênio. Híbrido XP 117. Safra 2020/21. Ricetec-Capão do Leão/RS.....	45
Figura 13	Número de grãos por panícula (unidade) de arroz em função	

	das doses de nitrogênio, na safra 2020/2021, na Estação Experimental RiceTec, Capão do Leão-RS. Bandas indicam o intervalo de confiança a nível de 95% de confiança.....	46
Figura 14	Análise de regressão das doses de nitrogênio ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e a esterilidade de espiguetas (%) de arroz nas porções Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente), utilizando o híbrido XP 117, na safra 2020/2021. Centro Tecnológico da RiceTec, Capão do Leão, RS.....	47
Figura 15	Análise de regressão linear e intervalo de confiança ( $\alpha=0,05$ ) entre as doses de nitrogênio e o peso de 1000 grãos (g) de arroz nas porções do sulco, superior, intermediária e inferior, na safra 2020/2021. Capão do Leão, RS.....	48
Figura 16	Panículas por metro quadrado de arroz irrigado no sistema sulco camalhão sob diferentes doses de Nitrogênio (Híbrido XP 117. Safra 2020/2021. CT RiceTec. Capão do Leão, RS.....	48
Figura 17a	Fluxos de $\text{N}_2\text{O}$ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ ) na safra 2020/2021 em solo cultivado com arroz irrigado no sistema sulco camalhão. Nas porções Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente). Híbrido XP 117. Centro tecnológico da Rice Tec. Capão do Leão, RS.....	51
Figura 17b	Relação entre o espaço poroso do solo ocupado por água (EPSA) e a atividade microbiana relativa. Adaptado de Linn e Doran (1984).....	52
Figura 17c	Produção de $\text{N}_2\text{O}$ durante os processos microbianos de nitrificação e desnitrificação. Adaptado de Davidson (1991).....	53
Figura 18	Fluxos de $\text{CH}_4$ ( $\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}\text{ h}^{-1}$ ) na safra 2020/2021 em solo cultivado com arroz irrigado no sistema sulco camalhão. Nas porções Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente). Híbrido XP 117. Centro tecnológico da Rice Tec. Capão do Leão, RS.....	55

Figura 19	Emissão sazonal de N <sub>2</sub> O em cultivo de arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Centro tecnológico Rice Tec. Capão do Leão, RS. Safra 2020/2021.....	56
Figura 20	Emissão sazonal de CH <sub>4</sub> em cultivo de arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Centro tecnológico Rice Tec. Capão do Leão, RS. Safra 2020/2021.1.....	57
Figura 21	Potencial de Aquecimento Global parcial (kg eq. CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> grãos) em solo cultivado com arroz irrigado no sistema sulco camalhão. Nas porções Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente). Híbrido XP 117. Centro tecnológico da RiceTec. Capão do Leão, RS. Safra 2020/2021.....	58
Figura 22	Taxa de volatilização de amônia diária (kg.ha <sup>-1</sup> /d), e a perdas provenientes da aplicação da ureia em duas adubações (a) e (b), ao longo de 28 dias.....	60
Figura 23	Perdas acumuladas de nitrogênio como amônia (N-NH <sub>3</sub> ) volatilizada (kg ha <sup>-1</sup> ) (Figura a e b) e (%) (Figura c, d), derivada da aplicação de ureia à cultura de arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Avaliações realizadas após a primeira (a) e segunda (b) adubação nitrogenada em cobertura. Centro tecnológico Rice Tec. Capão do Leão, RS. Safra 2020/2021.....	61
Figura 24	Produtividade de grãos de arroz irrigado por sulco sob doses de fósforo em híbrido de arroz XP 117 em rotação com soja. Estação Experimental RiceTec, Capão do Leão, RS. Bandas indicam o intervalo de confiança a nível de 95% de confiança. Sulcos com 150 m de comprimento e declividade de 0,1 % Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente	

	alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente).....	63
Figura 25	Altura de arroz irrigado em sistema sulco-camalhão, em rotação com soja, sob diferentes doses de fósforo. Híbrido XP 117.Safra 2020/21. Rice Tec, Capão do Leão, RS.....	64
Figura 26	Número de grãos por panícula (unidade) de arroz em função das doses de fosforo, na safra 2020/2021, na Estação Experimental RiceTec, Capão do Leão, RS. Bandas indicam o intervalo de confiança a nível de 95% de confiança.....	65
Figura 27	Análise de regressão entre das doses de fósforo (kg. ha <sup>-1</sup> ) (Fig.B) e a esterilidade de espiguetas (%) de arroz nas porções Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente), utilizando o híbrido XP 117, na safra 2020/2021. Centro Tecnológico da RiceTec, Capão do Leão, RS.....	66
Figura 28	Análise de regressão linear e intervalo de confiança ( $\alpha=0,05$ ) entre as doses de fósforo e o peso de 1000 grãos (g) de arroz nas porções do sulco, superior, intermediaria e inferior, na safra 2020/2021. Capão do Leão, RS.....	67
Figura 29	Panículas por metro quadrado de arroz irrigado no sistema sulco camalhão sob diferentes doses de Fosforo (Híbrido XP 117. Safra 2020/2021. CT Rice Tec. Capão do Leão, RS.....	67

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Resultados da análise química do solo <sup>1</sup> da área experimental antecedendo o cultivo do arroz. Capão do Leão, RS, 2020.....	29
Tabela 2	Descrição dos tratamentos de manejo para a adubação nitrogenada para o arroz irrigado por sulco, contemplando doses, época e parcelamento da aplicação e as porções da lavoura ao longo do sulco de irrigação.....	31
Tabela 3	Descrição das principais práticas de manejo do arroz e data/estádio de realização. Capão do Leão, RS. Safra 2020/2021.....	34

## Sumário

<b>1 Introdução</b> .....	16
<b>2 Revisão Bibliográfica</b> .....	18
2.1 Rotação soja/arroz.....	18
2.2 Importância da cultura do arroz.....	19
2.2.1 Arroz híbrido.....	20
2.3 Manejo da irrigação na cultura do arroz.....	20
2.4 Emissões de gases de efeito estufa da lavoura de arroz irrigado.....	22
2.5. Volatilização de amônia.....	23
<b>3 Hipótese</b> .....	25
<b>4 Objetivo Geral</b> .....	26
<b>5 Material e Métodos</b> .....	27
5.1 Caracterização da área experimental.....	28
5.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	30
5.2.1 Experimento 1. Resposta do arroz irrigado por sulco à adubação nitrogenada: efeito sobre a nutrição, desempenho produtivo, perdas de N por volatilização de amônia e emissão de gases de efeito estufa.....	30
5.2.2 Implantação, condução e avaliação da cultura do arroz.....	33
5.2.3 Variáveis medidas.....	34
5.2.3.1 Produção de matéria seca e nitrogênio acumulado na parte aérea.....	34
5.2.3.2 Teor de nitrogênio.....	34
5.2.3.3 Produtividade de grãos e componentes de produtividade.....	35
5.2.3.4 Avaliação de emissões de gases de efeito estufa.....	35
5.2.3.5 Avaliação de perdas de nitrogênio por volatilização de amônia.....	38
5.3 Experimento 2. Resposta do arroz irrigado por sulco à adubação fosfatada: efeito sobre a nutrição e desempenho produtivo.....	39
5.3.1 Tratamentos e delineamento experimental.....	39
5.3.2 Condução, avaliação e colheita da cultura do arroz.....	40
5.4 Análise estatística.....	41
<b>6 Resultados e Discussão</b> .....	41
6.1 Experimento 1. Resposta do arroz irrigado por sulco à adubação nitrogenada.....	41
6.1.1 Produtividade de grãos.....	41
6.1.2 Componentes de rendimento do nitrogênio.....	44

6.1.2.1 Altura de plantas.....	44
6.1.2.2 Grãos por panícula.....	45
6.1.2.3 Esterilidade de espiguetas.....	46
6.1.2.4 Peso de mil grãos.....	47
6.1.2.5 Panículas/m <sup>2</sup> .....	47
6.1.3 Emissões de gases de efeito estufa.....	49
6.1.3.1 Fluxos de N <sub>2</sub> O e CH <sub>4</sub> do solo.....	49
6.1.3.2 Emissões sazonais de N <sub>2</sub> O e CH <sub>4</sub> do solo.....	55
6.1.3.3 Potencial de aquecimento global parcial (PAGp).....	57
6.1.4 Volatilização de amônia.....	59
6.1.4.1 Taxa de volatilização diária de amônia.....	59
6.1.4.2 Perdas acumuladas por volatilização de amônia.....	60
6.2 Experimento 2. Resposta do arroz irrigado por sulco à adubação fosfatada: efeito sobre a nutrição e desempenho produtivo.....	62
6.2.1 Produtividade de grãos.....	62
6.2.2 Componentes de rendimento.....	63
6.2.2.1 Altura de plantas.....	63
6.2.2.2 Grãos por panícula.....	64
6.2.2.3 Esterilidade de espiguetas.....	65
6.2.2.4 Peso de mil grãos.....	66
6.2.2.5 Panículas/m <sup>2</sup> .....	66
<b>7 Conclusões.....</b>	<b>68</b>
<b>8 Referências Bibliográficas.....</b>	<b>69</b>

## 1 Introdução

A cultura da soja vem ganhando espaço cada vez maior na rotação com arroz irrigado nas áreas de terras baixas do Estado do Rio Grande do Sul (RS), com efeitos econômicos e sociais significativos para a região. Isto porque a soja se constitui em uma excelente ferramenta de redução de plantas daninhas das áreas de cultivo de arroz, especialmente o arroz daninho. Além disso, a soja apresenta menor custo de produção, quando comparada ao arroz.

A vantagem financeira não é o único benefício da inclusão da soja no sistema de produção. A rotação de culturas com soja significa também maior aporte de nitrogênio ao solo, via fixação biológica (FBN), e outras melhorias na fertilidade dos solos de terras baixas, de forma que as lavouras de arroz alcançam produtividades maiores quando cultivadas na safra de verão seguinte ao cultivo de soja. Segundo a SOSBAI (2018), as culturas estabelecidas em rotação ao arroz podem aproveitar a infraestrutura de irrigação estabelecida para essa cultura, sendo esse um diferencial das áreas de terras baixas.

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos grãos mais importantes cultivados mundialmente, estando presente na dieta básica de cerca de 2,7 bilhões de pessoas (SAHA et al., 2017). Sabe-se que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de grãos, atingindo altas produtividades graças ao desenvolvimento e utilização de novas tecnologias (BARONI et al., 2017). As cultivares de arroz híbrido se inserem no mercado de sementes como uma ferramenta adicional para viabilizar a orizicultura, além de torná-la competitiva, adequando o setor à nova realidade em que se exige um maior nível tecnológico (LEVIEN, 2000), proporcionando uma planta mais robusta com maior estabilidade produtiva, alto potencial produtivo, maior tolerância a doenças e ao estresse ambiental. Atualmente o uso de cultivares híbridas podem apresentar vantagem de rendimento de 15 a 20% em relação às variedades melhoradas de alto rendimento (FAO, 2004), contudo a adoção dos híbridos de arroz é ainda bastante incipiente no Brasil (< 5%) (SOSBAI, 2018)

A maioria das áreas de cultivo de arroz utilizam a irrigação por inundação contínua durante todo o ciclo da cultura, segundo Pinto et al. (2016), contudo, em diferentes regiões do planeta tem sido conduzido estudos visando

desenvolver alternativas de manejo da irrigação, objetivando, principalmente, a redução no uso de água (VORIES et al. 2013).

Atualmente, uma nova possibilidade, que tem sido utilizada com grande vantagem operacional e redução do custo de mão de obra é a irrigação em sulco, utilizando politubos infláveis, especialmente em áreas com baixa declividade. No estado de Arkansas, EUA, principal produtor de arroz deste país, 20% da produção do cereal é realizada em semeadura direta sobre a resteva de soja, cultivada em sistema sulco-camalhão, sendo o arroz irrigado por sulco (Comunicação Joseph Massey USDA). Esse sistema, embora possa reduzir a produtividade do arroz, apresenta, como vantagens, a diminuição do custo de produção, do uso de insumos, de água e de mão-de-obra, o que garante ganhos financeiros ao produtor.

Com o aumento das áreas sistematizadas com declividade e da adoção do sistema sulco-camalhão para o cultivo de soja na região orizícola do RS, estão surgindo lavouras de arroz semeadas em sistema plantio direto sobre a resteva da soja do ano anterior. Essas lavouras de arroz usualmente são irrigadas por inundação, requerendo a construção de taipas após a colheita da soja.. Entretanto, ficam os questionamentos: Seria possível irrigar essas lavouras de arroz no RS por sulcos, assim como é feito no Arkansas? Quais seriam as adequações necessárias para o manejo da água e da fertilização a fim de garantir altas produtividades? Quais os impactos sobre a eficiência da adubação nitrogenada e a emissão de gases de efeito estufa neste novo cenário?

Dessa forma, este trabalho objetivou-se avaliar as perdas de nitrogênio por volatilização, emissão de óxido nitroso e metano, componentes de rendimento, nutrição e produtividade de grãos de arroz irrigado por sulco em sistema sulco-camalhão sob doses de nitrogênio e fósforo.

## **2 Revisão Bibliográfica**

### **2.1. Rotação soja/arroz**

Conceitualmente, a rotação e sucessão de culturas consiste em alternar espécies vegetais no decorrer do tempo na mesma área agrícola, em sequência planejada. As culturas que fazem parte do sistema devem ser diferentes entre si de forma a explorar diferentes estratos do solo, bem como demandar recursos edafoclimáticos em níveis distintos (EMBRAPA, 2017).

A ampliação do monocultivo de arroz irrigado impulsionou uma grande pressão por plantas daninhas invasoras, que tiveram certo grau de êxito no controle nos anos 2000 com a utilização do sistema clearfield® além de herbicidas específicos e seletivos para a cultura do arroz. Posteriormente, em razão da utilização em larga escala e frequente dessas moléculas de herbicidas começaram a originar-se alguns biotipos de plantas daninhas resistentes aos principais herbicidas utilizados. Nesse cenário, muitas áreas se tornaram inviáveis ao cultivo de arroz e a única alternativa para redução dessa pressão de invasoras foi a rotação de culturas, especificamente com a cultura da soja, que utiliza princípios de herbicidas totalmente distintos ao sistema de produção de arroz irrigado. No entanto, o cultivo de soja em áreas de terras baixas possui alguns desafios, devido, principalmente em relação à drenagem deficiente. Em menor ordem de importância são solos quimicamente mais pobres em nutrientes na sua maioria e ácidos, 80% com pH < 5,5 (BOENI et al., 2010), contudo pode ser solucionado em curto prazo com adubação e calagem.

Desde 2010 houve uma expansão considerável do cultivo de soja em terras baixas, onde há atualmente o cultivo de 380 mil ha somente em rotação com arroz irrigado (IRGA, 2021). Neste período, houve uma ampliação de informações em relação a adubação, época de semeadura, cultivares mais adaptadas, uso de mecanismos rompedores de solo para atenuar áreas compactadas entre outras práticas. Contudo, sabe-se que nos solos de terras baixas é muito tênue as faixas de umidade no solo de uma condição de excesso hídrico para o déficit hídrico. Em relação ao excesso de umidade há avanços e investimentos dos produtores em relação a macro e micro drenagem que atenuam consideravelmente os danos pelo excesso de água e conseqüentemente a baixa disponibilidade de oxigênio para as

plantas. Por outro lado, é frequente nos meses de verão no RS, especialmente na metade Sul a ocorrência de períodos de estiagem que reduzem a produtividade das lavouras de soja. Neste cenário, há alguns sistemas emergentes para a irrigação da cultura da soja, sendo os mais usados os sistemas de irrigação por aspersão com carretéis e o sistema de camalhão, onde é realizada a irrigação por sulco com suporte de politubos de PVC.

Um fator importante para que se atinja uma produtividade satisfatória seria adequar o sistema de irrigação para que não ocorra um excesso hídrico e nem falta dela, com isso, alternativas como o sistema sulco-camalhão visa atingir as melhores condições hídricas para a cultura. No entanto, para a redução dos gastos operacionais, alternativas como a rotação vem sendo adotados para que se consiga utilizar esse sistema para irrigar o arroz, que necessita de uma maior quantidade de água. A cultura do arroz implantada em área onde se cultivou soja agrega a fixação biológica de nitrogênio, diminui a incidência no ciclo de insetos-pragas e de doenças, demonstra efeitos como a melhor utilização do solo e dos nutrientes (SCHOENFELD, 2010; SCHERNER et al., 2018).

## 2.2. Importância da cultura do arroz

No Brasil, o Estado do Rio Grande do Sul (RS) é o principal protagonista em produção, sendo responsável por cerca de 70% do volume total produzido, numa área semeada por volta de um milhão de hectares (média anual), caracterizado por sistemas produtivos de cultivo de arroz em rotação com soja e pecuária de corte. O manejo do solo em terras baixas ainda há alta mobilização dos solos e baixa utilização de estratégias conservacionistas o que faz com que o plantio direto seja usado em menos de 5% da área cultivada com arroz (SOUSA et al., 2021). Com o lançamento de cultivares mais produtivos maior inserção da rotação com a cultura da soja a produtividade média de arroz irrigado no RS foi de 9 Mg ha<sup>-1</sup> na safra 2020/21 (IRGA, 2021).

O sistema de irrigação por inundação contínua, utilização de cultivares de alto potencial genético e a aplicação de tecnologia elevada são os fatores responsáveis corroborando o resultado exposto por essa produtividade (VAHL, 1991). Segundo Menezes et al. (2004), um dos principais fatores que proporcionam incrementos de produtividade nas lavouras orizícolas gaúchas é entrada de água antecipada e o correto manejo da adubação nitrogenada. O nitrogênio é o nutriente de maior

importância para a produtividade do arroz, porém, a eficiência do nutriente é bastante variável, devido sua complexa interação de fatores que interferem o seu aproveitamento pela cultura (SCIVITTARO e MACHADO, 2004).

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

### 2.2.1 Arroz híbrido

No Rio Grande do Sul, a área cultivada com arroz na safra 2020/21 foi de 935 mil ha (IRGA, 2021). A adoção do arroz híbrido pelos agricultores vem aumentando nos últimos anos, sendo que, no estado do RS, mais de 70.000 ha foram cultivados em 2014 e atualmente em SC estima-se que 20.000 ha tenham sido estabelecidos com sementes de arroz híbrido. A adoção do arroz híbrido em Santa Catarina merece destaque, pois é realizada por agricultores com área média de 10 ha, que tem seu sustento praticamente baseado no cultivo do arroz (CONAB, 2018).

Os híbridos de arroz, que tem como principais características altos potenciais produtivos e estabilidade de produção, podem trazer benefícios diretamente ligados a segurança alimentar, garantindo a produção de um alimento base da população brasileira, a sustentabilidade da atividade agrícola, com maior rentabilidade ao produtor rural e, ainda a proteção ambiental, buscando incessantemente otimização da área cultivada com maior produção de alimentos por área (KEMPE e GILS, 2011). Contudo, ainda são pouco cultivados no Brasil (~ 5%) em razão da alta produtividade das cultivares presentes no mercado, baixa qualidade de grãos dos híbridos e do alto custo de aquisição de semente.

### 2.3. Manejo da irrigação na cultura do arroz

Na grande maioria das áreas cultivadas com arroz irrigado no RS a irrigação é realizada por inundação contínua do sulco. Mais recentemente, com o intuito de racionalizar o uso da água na irrigação por inundação na cultura do arroz, alguns estudos têm sido realizados utilizando-se métodos alternativos de manejo da irrigação, tanto no estado do Rio Grande do Sul (SCIVITTARO et al., 2010), como na

região do Delta, no Mississippi/USA (MASSEY et al., 2014). Segundo TRACY (1993), os orizicultores do Missouri, EUA, começaram a produção irrigada por sulcos a partir de 1990, no qual interesse no sistema de cultivo aumentou nos últimos anos.

Atualmente, cerca de 30% do arroz é produzido com irrigação por sulco. Em campos bem adaptados ao arroz inundado, a irrigação por sulco geralmente não aumenta a produção. A principal vantagem do arroz irrigado por sulcos é que não são necessários diques e portões. Isso economiza tempo e mão de obra para os produtores de arroz, e também possibilita drenar a soja, reduzindo o custo de irrigação quando comparado com a irrigação contínua.

Na região do Delta no Mississippi/USA (MASSEY et al., 2014), o arroz é normalmente cultivado em rotação com soja. Com o arroz irrigado por sulco, são necessários menos preparo e mão-de-obra porque os diques de arroz não precisam ser removidos antes do plantio da soja. Durante a temporada de arroz, as comportas precisam ser monitoradas e ajustadas. Se um dique não estiver suficientemente empacotado antes de estabelecer uma inundação permanente, são necessários reparos manuais.

A irrigação por sulco também pode usar menos água do que a inundação em cascata, dependendo de como ela é gerenciada. Os produtores são incentivados a usar sensores de umidade do solo e programas climáticos de balanço hídrico do solo para programar irrigações de sulcos, a fim de economizar recursos hídricos (TRACY, 1993).

Na irrigação contínua, ao ser estabelecida a lâmina de água, ocorrem diversas alterações no solo pela modificação de suas características físicas, químicas, biológicas e eletroquímicas (SOUZA et al., 2010). Após a submersão do solo, o oxigênio molecular é reduzido rapidamente, devido a sua utilização pelos microorganismos aeróbios em seus processos biológicos (CAMARGO et al., 1999).

O oxigênio é o maior receptor de elétrons (agente oxidante) da natureza e, na sua ausência, os microorganismos anaeróbios obrigatórios ou facultativo utilizam os compostos oxidados inorgânicos (respiração anaeróbia) e orgânico (fermentação). Os receptores inorgânicos de elétrons seguem uma sequência termodinâmica de redução, iniciando pelo  $\text{N-NO}_3$ , seguido por  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{SO}_4^{4-}$  (CAMARGO et al., 1999).

Assim, após um período em hipóxia, ocorrem mudanças na dinâmica eletroquímica da solução do solo, verificadas pelo pH, potencial redox (Eh) e

condutividade elétrica (CE), medidas do fator intensidade de acidez, intensidade de redução e presença de íons na solução, respectivamente. Ao longo do tempo de alagamento, ocorre o aumento do pH e a diminuição do Eh (GRIEBELER et al., 2010), além de maiores valores de Ce (SOUZA et al., 2010).

Já na irrigação por sulco, a produção de arroz em larga escala contribui para a emissão de gases do efeito estufa, sobretudo o metano e óxido nítrico, isso quando aeração atinjam valores maiores de Eh. Com alternância da irrigação faz com que diminua a emissão de metano, mas por outro lado, induz a perdas de N por desnitrificação. Em locais onde o solo está mais seco (ou nas partes intermediárias do sulco) pode ter maiores perdas de N por volatilização de  $\text{NH}_3$ .

Com o potencial redox maior do solo, pode ser que as reações de redução dos óxidos de ferro sejam menos intensas e pode haver menor disponibilidade de fósforo no solo, situação essa que faz com que possivelmente o arroz irrigado por sulco tenha maior necessidade de adubação fosfatada.

#### 2.4. Emissões de gases de efeito estufa da lavoura de arroz irrigado

No Brasil, a parcela de contribuição da agropecuária é analisada separadamente, contribuindo com 24% das emissões de GEE do País no ano de 2017 (SEEG, 2019). Dentre as diversas atividades ligadas à agropecuária, o cultivo de arroz participa com 2,6% das emissões dentro desse setor.

O alagamento do solo e a manutenção de uma lâmina de água durante o cultivo do arroz irrigado provocam alterações químicas, físicas e biológicas que levam esses ambientes a um estado de equilíbrio distinto ao observado antes do alagamento (SOUZA et al., 2009). Segundo estes mesmos autores, estas transformações são oriundas do baixo suprimento de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e, em consequência, da proliferação de bactérias anaeróbias que, para obtenção de energia utilizam outros compostos, que não o  $\text{O}_2$ , como receptores de elétrons configurando o processo de redução do solo (PONNAMPERUMA, 1972).

O manejo da água é de fundamental importância para o sucesso da produção de arroz irrigado por inundação e tem influência na emissão de metano. Considerando-se o suprimento de água para a cultura do arroz, basta que o solo se mantenha uniformemente saturado durante todo o ciclo, porém, há três fases durante o ciclo de desenvolvimento em que a cultura é mais exigente: estabelecimento do cultivo, perfilhamento e no período entre o início da

diferenciação da panícula e o enchimento de grãos (EMBRAPA, 1999).

As emissões de  $N_2O$  estão associadas, principalmente, à utilização de adubos nitrogenados, contribuindo com a intensificação dos processos de nitrificação e desnitrificação, que geram o óxido nitroso como produto intermediário (O'MARA, 2012; REDDY; DELAUNE, 2008).

O arroz irrigado constitui-se em importante fonte de  $CH_4$ , devido ao ambiente anaeróbico proporcionado pela inundação do solo. Isto porque nesse ambiente a decomposição da matéria orgânica ocorre por fermentação, com a produção de  $CH_4$  (MALYAN et al., 2016).

A redução no período de irrigação, seja pelo atraso na irrigação, ou pelo uso de cultivares de ciclo curto, ou pela adoção de períodos de drenagem durante o ciclo da cultura proporciona redução na produção de metano. Drenagens durante o ciclo de cultivo proporcionam a aeração do solo, com a consequente elevação do potencial de redução do solo, inibindo a ação das bactérias metanogênicas e promovendo a oxidação do metano para dióxido de carbono, que é um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento 34 vezes menor que o metano (IPCC, 2013).

## 2.5. Volatilização de amônia

O nitrogênio é um dos nutrientes que mais apresentam transformações nos solos, estando sujeito a perdas significativas que reduzem a eficiência de fertilizantes nitrogenados com reflexo na produtividade das culturas e no ambiente (CANTARELLA, 2007; NASCENTE et al., 2011; MORO et al., 2014).

A ureia é o principal adubo nitrogenado utilizado no Brasil (IPNI, 2014). Esse fertilizante apresenta uma série de vantagens, tais como o menor preço por unidade de N; alta concentração de N que reduz o custo de transporte e da aplicação; alta solubilidade e menor corrosividade (FAGERIA, 2014). No entanto, a principal desvantagem da ureia é a suscetibilidade de altas perdas de N por volatilização de amônia ( $NH_3$ ) (KOELLIKER KISSEL, 1988; CANTARELLA, 2007). A amônia perdida por volatilização envolve inicialmente a hidrólise da ureia por meio da urease, que é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo, ou ainda originada dos restos vegetais (HARGROVE, 1988; BYRNES, 2000), dependendo das condições climáticas e edáficas. Segundo Volk (1959), o teor de umidade do solo é um fator importante na hidrólise, pois, de maneira geral, pode ocorrer em solos com níveis de umidade variados e, quanto mais rápida a hidrólise,

maior o potencial de perda de amônia. Segundo Savant et al. (1987), a adição de água promove aumento da difusão a ureia e, conseqüentemente, maior contato com a urease no solo.

Outros fatores também que afetam a volatilização de amônia, como a temperatura, as trocas gasosas, a taxa de evaporação de água, o poder tampão, a capacidade de troca catiônica e a classe textural (teor de argila) (HARGROVE, 1988; BYRNES, 2000). Outros autores ainda consideram a concentração de N amoniacal na água de inundação, a velocidade do vento, a quantidades de N aplicado, o momento vegetativo das plantas quando da aplicação e o método da aplicação de N (VLEK e CRASWELL, 1981; MIKKELSEN, 1987).

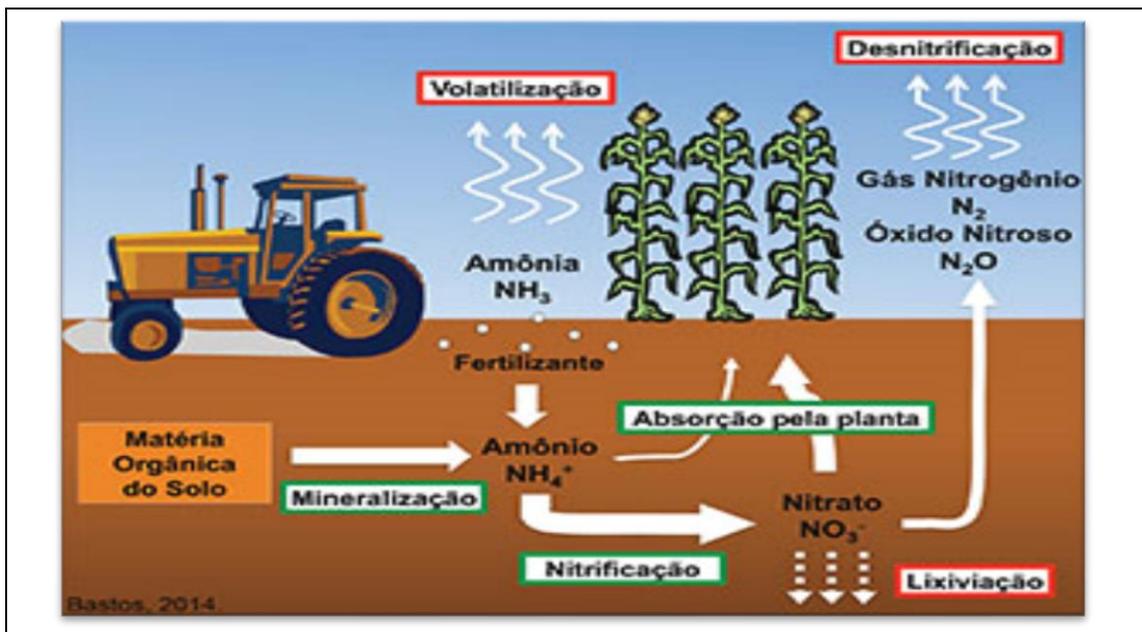


Figura 1 - Ciclo do nitrogênio e principais perdas em solos agrícolas.  
Fonte: Bastos (2004).

### **3 Hipóteses**

A alternância dos ciclos de umedecimento e secagem do solo induzem a maiores perdas de N por desnitrificação no sistema de irrigação por sulco e maior emissão de  $N_2O$ . Este sistema permite uma maior superfície do solo com baixa umidade e sem lâmina de água o que potencializa as perdas por volatilização de  $NH_3$ . Dessa forma, como há maiores perdas de nitrogênio o arroz irrigado por sulco possui maior exigência em N na adubação em comparação ao sistema conduzido sob irrigação contínua.

A irrigação por sulco possibilita maior aeração ao solo e aumento do potencial redox que reduz o teor de fósforo na solução do solo o que exige maiores níveis de fósforo na adubação da cultura do arroz em comparação ao sistema de irrigação contínua.

A maior oxigenação do solo reduz a emissão de  $CH_4$  e conseqüentemente o PAG do arroz irrigado por sulco em comparação ao sistema de irrigação contínua.

## **4 Objetivos**

### **4.1 Objetivo geral**

Avaliar o efeito do manejo da adubação sobre a nutrição, desempenho agrônômico e produtivo, emissão de gases de efeito estufa e perdas de nitrogênio por volatilização de amônia em cultivo de arroz irrigado por sulco.

### **4.2 Objetivos específicos**

Determinar a resposta à adubação nitrogenada e fosfatada do arroz em cultivo irrigado por sulco.

Determinar a eficiência de uso de nitrogênio do arroz em cultivo irrigado por sulco.

Avaliar as perdas de nitrogênio por volatilização de amônia em cultivo de arroz irrigado por sulco.

Determinar as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O associadas ao cultivo de arroz irrigado por sulco.

## 5 Material e Métodos

O estudo compreendeu dois experimentos de manejo da adubação para o arroz irrigado por sulco (Figura 2), que foram realizados sob condições de campo no Centro Tecnológico da Ricetec, em Capão do Leão-RS, na safra 2020/2021, em área previamente cultivada com soja em sistema sulco-camalhão (safra 2019/20) (Figura 3).

No experimento 1 foi avaliada a resposta à adubação nitrogenada do arroz irrigado por sulco e os efeitos sobre as perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e emissões de gases de efeito estufa. O experimento 2 avaliou a resposta à adubação fosfatada da cultura do arroz irrigado em sistema sulco-camalhão.



Figura 2 - Vista aérea da área experimental cultivada com arroz irrigado por sulco (fase de estabelecimento da cultura).

Fonte: Afonso Brum



Figura 3 - Vista geral da área experimental cultivada com soja em sistema sulco-camalhão na safra 2019/2020.

Fonte: Pâmela Andrades Timm

### 5.1 Caracterização da área experimental

O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háplico (STRECK et al., 2018). Os resultados da análise química do solo, na profundidade de 0-20cm, por ocasião da implantação da cultura do arroz são apresentados na Tabela 1. Os teores de matéria orgânica, fósforo e potássio são interpretados, respectivamente, como baixo, alto e baixo conforme SOSBAI (2018).

A adubação média da soja cultivada em sistema sulco-camalhão na safra 2019/2020 correspondeu a 155 e 165 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente, tendo sido estabelecida considerando-se uma expectativa de produtividade de 4 Mg ha<sup>-1</sup>, tendo-se alcançado, porém, produtividade média de 3.840 Mg ha<sup>-1</sup>.

Em ambos os experimentos utilizou-se o híbrido de arroz irrigado XP117, da empresa Ricetec, com ciclo de 130 dias (Figura 4). Os híbridos são os materiais comumente utilizados em cultivos irrigado por sulco nos Estados Unidos, apresentando bom desempenho agrônômico e produtivo nesse sistema.

Tabela 1 - Resultados da análise química do solo<sup>1</sup> da área experimental antecedendo o cultivo do arroz. Capão do Leão-RS, 2020.

pH água	5,1
Índice SMP	6,0
M.O. (g dm <sup>-3</sup> )	16,0
P (mg dm <sup>-1</sup> )	7,0
K (mg dm <sup>-1</sup> )	49
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,3
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,4
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,8
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,9
CTC <sub>pH7,0</sub>	9,2
Argila (g dm <sup>-3</sup> )	220

Fonte: TEDESCO et al. (1995).



Figura 4 - Vista de área cultivada com a cultivar híbrida de arroz irrigado XP117, da empresa RiceTec, em Capão do Leão-RS.

Fonte: Pablo Abelaira.

## 5.2 Tratamentos e delineamento experimental

5.2.1 Experimento 1. Resposta do arroz irrigado por sulco à adubação nitrogenada: efeito sobre a nutrição, desempenho produtivo, perdas de N por volatilização de amônia e emissão de gases de efeito estufa

O experimento compreendeu a combinação de quatro doses de nitrogênio (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N) e três condições de umidade do solo (úmido, saturado e inundado) para a cultura do arroz, estabelecidas ao longo dos sulcos de irrigação.

Os sulcos de irrigação apresentavam cerca de 150 m de comprimento e 0,1% de declividade. A porção inferior dos sulcos permaneceu integralmente inundada ao longo do período de cultivo do arroz; a porção intermediária foi mantida a maior parte do tempo com solo saturado e a porção superior, com solo úmido, sendo, portanto, a área mais oxidada e com maior variabilidade na condição de umidade (Figura 5). Nas porções superior, intermediária e inferior do sulco foram distribuídas, ao acaso, quatro repetições dos tratamentos, com 10 m de comprimento.

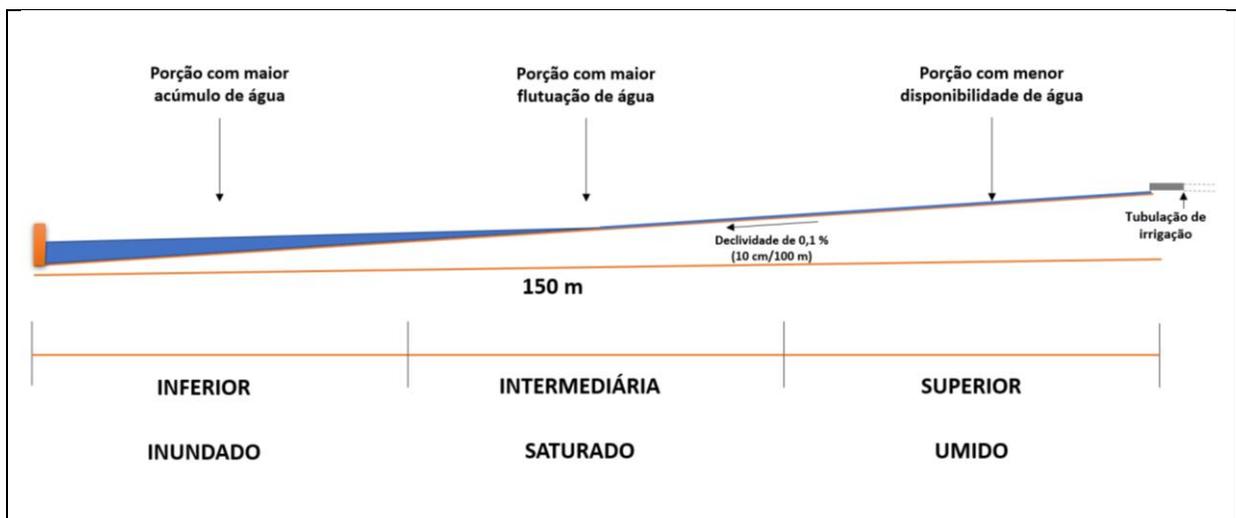


Figura 5 - Ilustração representativa de corte transversal de lavoura de arroz irrigado por sulco, retratando as porções inferior, intermediária e superior, bem como sua respectiva condição de umidade do solo. Dimensão aproximada do sulco de irrigação 150 m e declividade de 0,1%.

Fonte: Filipe Selau Carlos.

Como fonte de nitrogênio, utilizou-se ureia, para evitar a interferência de outros nutrientes sobre a resposta do arroz irrigado à adubação nitrogenada. Todas as parcelas experimentais receberam a aplicação de quantidades fixas de fósforo e de potássio, correspondentes a 90 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 (SOSBAI, 2018).

O experimento foi delineado em faixas de 3,6 m x 150 m, ou seja, 20 linhas de

plantas de arroz, espaçadas entre si em 17,5 cm (quatro camalhões com 0,90 m de largura) com 150 m de comprimento. Nas porções superior, intermediária e inferior de cada faixa foram distribuídas, ao acaso, quatro repetições dos tratamentos, com 10 m de comprimento, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Descrição dos tratamentos de manejo para a adubação nitrogenada para o arroz irrigado por sulco, contemplando doses, época e parcelamento da aplicação e as porções da lavoura ao longo do sulco de irrigação.

Porção da lavoura	Dose de N kg ha <sup>-1</sup>	Época e parcelamento do N
Superior	0	----
Superior	60	100% dose N em V4
Superior	120	65% V4; 35% R0
Superior	180	50% V4; 25% V7/V8; 25% R0
Intermediária	0	----
Intermediária	60	100% dose N em V4
Intermediária	120	65% V4; 35% R0
Intermediária	180	50% V4; 25% V7/V8; 25% R0
Inferior	0	----
Inferior	60	100% dose N em V4
Inferior	120	65% V4; 35% R0
Inferior	180	50% V4; 25% V7/V8; 25% R0

Durante todo o período de cultivo do arroz, a irrigação da cultura por sulco (Figura 6) foi realizada a cada três dias. A duração de cada irrigação foi definida em estudo preliminar de avaliação da capacidade de infiltração de água do solo, que define o perímetro de molhamento. Chuvas superiores a 8 mm substituíram uma irrigação (Figura 7). O monitoramento da umidade do solo foi realizado diariamente utilizando-se tensiômetros, instalados na profundidade de 15 cm, nas porções superior, intermediária e inferior dos sulcos de irrigação.

O efeito dos tratamentos foi avaliado separadamente nas unidades experimentais dispostas nos três setores da lavoura, superior, intermediário e inferior, que são representativos das condições de solo drenado, saturado e inundado, respectivamente. Abrangeu, ainda, linhas dispostas nos sulcos e nos camalhões.



Figura 6 - Irrigação do arroz por sulco, utilizando politubos.  
Fonte: Pâmela Andrades Timm.

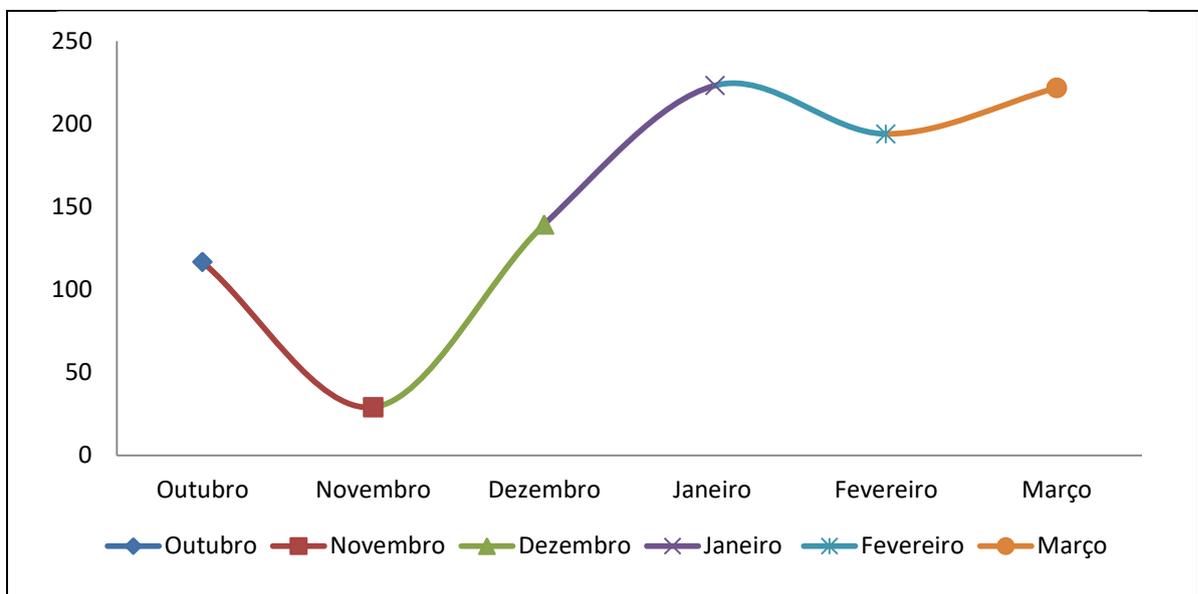


Figura 7 - Precipitação mensal acumulada (mm) durante o ciclo da cultura do arroz, na Estação experimental da RiceTec. Capão do Leão-Rs. Safra 2020/2021.  
Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas (Capão do Leão).

### 5.2.2 Implantação, condução e avaliação da cultura do arroz

O arroz foi semeado no dia 17 de outubro de 2020 em semeadura direta sobre a resteva da vegetação espontânea estabelecida no período de outono/inverno e aproveitada para atividade pecuária durante o inverno (Figura 8). Utilizou-se um espaçamento entre linhas de 17,5 cm e densidade de semeadura de 50 kg ha<sup>-1</sup> de sementes.

O controle de plantas daninhas e demais práticas culturais para a cultura seguiram as indicações técnicas para o arroz irrigado na região Sul do Brasil (SOSBAI, 2018). Para o acompanhamento dos estádios de desenvolvimento da planta de arroz, utilizou-se, como referência, a escala de Counce et al. (2000). A descrição das principais práticas de manejo realizadas encontra-se na Tabela 3.



Figura 8 - Vista da área experimental estabelecida em sistema sulco-camalhão, previamente à semeadura do arroz irrigado.

Fonte: Pâmela Andrades Timm

Tabela 3 - Descrição das principais práticas de manejo do arroz e data/estádio de realização. Capão do Leão, RS. Safra 2020/2021.

Data	Prática de manejo
17/10/2020	Adubação básica em pré-semeadura (fontes de N e P)
17/10/2020	Semeadura do arroz: híbrido XP 117; densidade: 50 kg/ha
18/10/2020	Adubação potássica em pós-semeadura (aplicação a lanço em superfície)
19/10/2020	Instalação dos sistemas coletores de GEE e de amônia
30/10/2020	Emergência do arroz
21/11/2020	1ª Adubação nitrogenada em cobertura (estádio V4)
21/11/2020	Início da irrigação do arroz por sulco
21/11/2020	Início das coletas para avaliação das emissões de GEE e perdas de nitrogênio por volatilização de amônia
11/12/2020	2ª Adubação nitrogenada em cobertura (V7/V8)
28/12/2020	3ª Adubação nitrogenada em cobertura (R0/R1)
16/03/2021	Colheita do arroz

### 5.2.3 Variáveis medidas

#### 5.2.3.1 Produção de matéria seca e nitrogênio acumulado na parte aérea

Para a obtenção dos dados de produção de matéria e de nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz foram realizadas coletas do material vegetal de cada unidade experimental, nas três porções (inferior, intermediário e superior) do sulco disposto ao longo do terreno. As amostras foram constituídas pelas plantas contidas em 0,5 m de linha de cada unidade experimental. Nos momentos das coletas, foi identificado o estágio de desenvolvimento das plantas de arroz, da qual foram realizadas em estágio R6 e ao final do ciclo da cultura, antes da colheita.

O material vegetal colhido foi separado em colmos, folhas e panículas com grãos (para as coletas realizadas após a floração) e, posteriormente, seco em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C, até atingir massa constante. Após, as amostras foram pesadas, moídas e analisadas, para determinação das concentrações de N no tecido vegetal, segundo método descrito em Tedesco et al. (1995).

#### 5.2.3.2 Teor de nitrogênio

As amostragens de planta para avaliação do nível de N na planta foram realizadas nos estádios V8; R1 e R4, consistindo na coleta da folha índice (última completamente desenvolvida – V8 e R1) ou da folha bandeira (R4) de 48 plantas por parcela experimental. As amostras coletadas foram secas, moídas, digeridas e submetidas à análise química, determinando-se o teor de N no tecido vegetal (TEDESCO et al., 1995). Os valores determinados foram utilizados para a comparação do efeito dos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada para o arroz, bem como contrastados com padrões estabelecidos para a cultura (SOCIEDADE, 2016).

#### 5.2.3.3 Produtividade de grãos e componentes de produtividade

Na maturação da colheita, foram realizadas as avaliações de número de perfilhos, número de panículas, estatura da planta, produtividade de grãos e componentes de produtividade do arroz (número de grãos por panícula, esterilidade de espiguetas e massa de 1000 grãos). A colheita do arroz foi realizada quando o teor médio de umidade dos grãos atingiu 22%, ocorrendo no dia 16 de março. Foram colhidas parcelas de 2 m x 2 m, submetidas a trilha mecânica, retirada as impurezas e determinado o peso e a umidade de grãos. Posteriormente a produtividade de grãos foi padronizada na umidade de 13%.

#### 5.2.3.4 Avaliação de emissões de gases de efeito estufa

A avaliação das emissões dos gases de efeito estufa  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  foi realizada utilizando-se o método da câmara estática fechada (MOSIER, 1989) (Figura 9). A coleta de amostras foi realizada em intervalos regulares de 7 dias, exceção feita para as semanas em que foram realizadas as adubações nitrogenadas em cobertura para o arroz, quando a frequência de amostragem foi aumentada para a cada dois dias. Três sistemas coletores de amostras de GEE foram instalados nas porções superior, intermediária e inferior dos sulcos de irrigação do arroz, exclusivamente das parcelas relativas ao tratamentos com a aplicação da dose recomendada de N para a cultura do arroz.

As amostragens de ar foram realizadas sempre no período da manhã, entre as 9 e 12 horas, horário em que as emissões representam a média diária para a região de cultivo (COSTA et al., 2008). Para as coletas, câmaras de alumínio foram dispostas sobre as bases, formando um sistema hermeticamente fechado por meio

da presença de água em canaleta disposta na parte superior das bases onde as câmaras são apoiadas (GOMES et al., 2009). A medida em que as plantas cresceram, foram colocados extensores sobre as bases e os topos dos sistemas coletores.

As amostragens de ar foram realizadas no período compreendido entre o dia 21 de novembro de 2020 (juntamente com o início da irrigação e primeira adubação de cobertura) e o dia 22 de março de 2021, correspondendo a uma semana após a colheita do arroz.

As amostras de ar do interior das câmaras foram tomadas manualmente com auxílio de seringas de polipropileno (20 mL), equipadas com válvulas do tipo *Luer Lock*, nos tempos 0; 5; 10; e 20 minutos após seu fechamento. O ar no interior das câmaras foram homogeneizado durante 30 segundos antes de cada amostragem, por meio de ventiladores presentes na parte superior das câmaras, e a temperatura interna monitorada com auxílio de termômetro digital de haste com display externo. Imediatamente após as amostragens, as amostras foram transferidas para frascos evacuados.

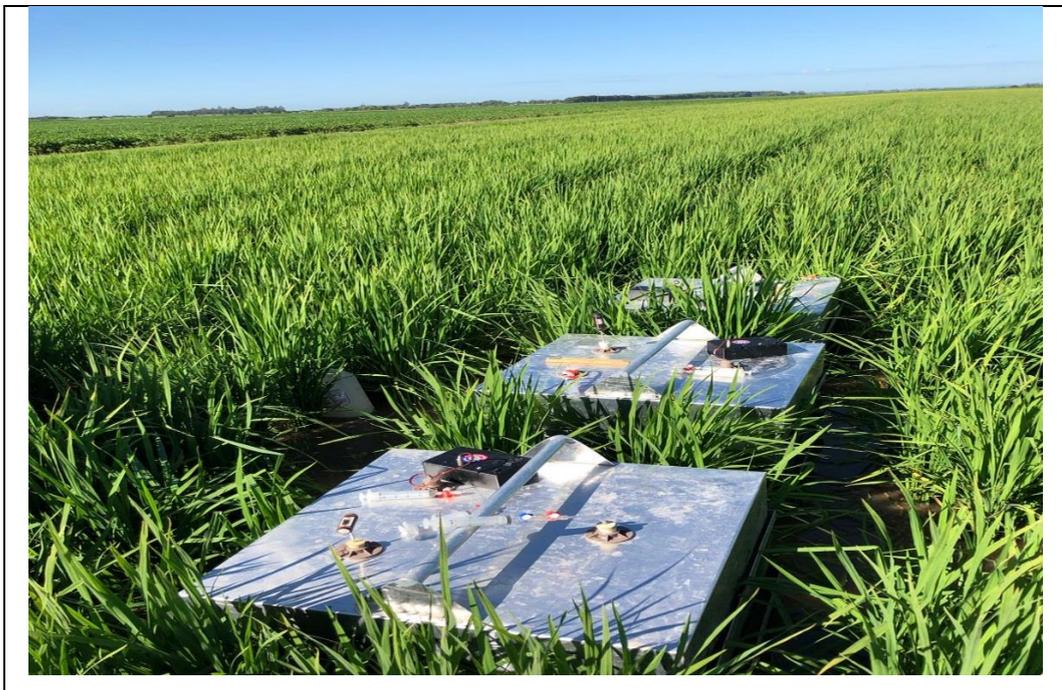


Figura 9 - Sistema coletores de amostras de gases de efeito estufa do tipo câmara estática fechada.

Fonte: Pablo Abelaira.

As concentrações de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O nas amostras foram determinadas por cromatografia gasosa, no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), utilizando cromatógrafo Shimadzu GC-2014, modelo “Greenhouse” e as taxas de emissão calculadas utilizando-se a equação:

$$f = (\Delta C/\Delta t) \cdot (\dot{M}PV/RT) \cdot (1/A)$$

onde:

$f$  é o fluxo de CH<sub>4</sub> ou N<sub>2</sub>O ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ );

$\Delta C/\Delta t$  corresponde a mudança na concentração de CH<sub>4</sub> ou N<sub>2</sub>O ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) no intervalo de tempo  $t$  (min);

$\dot{M}$  é a massa molar do gás ( $\mu\text{g mol}^{-1}$ );

$P$  é a pressão atmosférica (atm) no interior da câmara (assumida como 1,0 atm);

$V$  é o volume da câmara (L);

$R$  é a constante dos gases ideais ( $0,08205 \text{ atm L mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );

$T$  é a temperatura dentro da câmara no momento da amostragem (K);

$A$  é a área da base da câmara ( $\text{m}^2$ ).

A taxa de aumento do gás no interior da câmara foi determinada pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo.

As emissões sazonais de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O foram calculadas pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de N<sub>2</sub>O e de CH<sub>4</sub> do solo (GOMES et al., 2009). Com base nas emissões acumulada de CH<sub>4</sub> e de N<sub>2</sub>O, foi calculado o potencial de aquecimento global parcial (PAGp), convertendo-se as emissões de CH<sub>4</sub> e de N<sub>2</sub>O para CO<sub>2</sub> equivalente por meio da seguinte equação:

$$PAGp = (CH_4 \times 32) + (N_2O \times 298)$$

onde:

PAGp é o potencial de aquecimento global parcial ( $\text{kg CO}_2 \text{equiv. ha}^{-1}$ );

$\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  são as emissões acumuladas de cada gás durante a safra ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), 325 e 298 são os valores de PAG para o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{N}_2\text{O}$ , respectivamente, considerando-se um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (IPCC, 2013).

Os fluxos diários de  $\text{CH}_4$  e de  $\text{N}_2\text{O}$  e as emissões sazonais desses gases foram analisadas de forma descritiva (média  $\pm$  desvio padrão). Por sua vez, as emissões sazonais desses gases e o potencial de aquecimento global parcial e o índice PAGp em escala de rendimento de grãos foram submetidos à análise de variância e, quando significativa, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

#### 5.2.3.5 Avaliação de perdas de nitrogênio por volatilização de amônia

A avaliação das perdas de N da ureia por volatilização de amônia foi realizada por um período de 21 dias, por ocasião das adubações nitrogenadas para a cultura (semeadura; V4; V7 e R0 – de acordo com o tratamento). Utilizaram-se coletores construídos seguindo modelo de Nömmik (1973), modificado por Cantarella et al. (2003). Os coletores foram constituídos por tubos vazados, em PVC, com 30 cm de diâmetro interno e 50 cm de altura, nos quais foram dispostos dois discos de espuma de polietileno com 2 cm de espessura, a 2,5 cm e 15 cm da extremidade superior (Figura 10). Ambos os discos de espuma foram impregnados com solução de ácido fosfórico e glicerina para adsorver a amônia volatilizada, que foi extraída com solução molar de cloreto de potássio e determinada por destilação por arraste de vapor. O disco superior destina-se à adsorção de possíveis contaminações de  $\text{NH}_3$  proveniente da atmosfera e o inferior, daquela oriunda do fertilizante. A extremidade superior do tubo foi coberta com filme plástico afixado com cinta de látex e por um tampo em madeira. As câmaras de volatilização foram enterradas no interior das três seções das parcelas experimentais (superior, intermediária e inferior), na profundidade de 10 cm.

Em cada época de avaliação, as determinações de amônia volatilizada foram avaliadas no 1<sup>o</sup>; 2<sup>o</sup>; 4<sup>o</sup>; 7<sup>o</sup>; 14<sup>o</sup> e 21<sup>o</sup> dias após a aplicação do fertilizante nitrogenado, visto que os fluxos de  $\text{NH}_3$  concentram-se no período posterior à

aplicação dos fertilizantes nitrogenados (MADARI et al., 2011). As perdas de  $\text{NH}_3$  proveniente dos fertilizantes em cada coleta foram calculadas subtraindo-se os valores medidos na testemunha sem N daqueles medidos nas parcelas com aplicação de N. Adicionalmente, foram determinadas as perdas acumuladas ao longo de cada período de avaliação.



Figura 10: Coletores de PVC para determinar as perdas de amônia volatilizada  
Fonte: Pâmela Andrades Timm

### 5.3 Experimento 2 - Resposta do arroz irrigado por sulco à adubação fosfatada: efeito sobre a nutrição e desempenho produtivo

#### 5.3.1 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos incluíram quatro doses de fósforo para a cultura do arroz: 0, 30, 60 e 120  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Como fonte de fósforo, utilizou-se, superfosfato triplo. Para evitar interferência de outros nutrientes sobre a resposta do arroz irrigado por sulco à adubação fosfatada, todas as parcelas experimentais receberam a aplicação de quantidades de 150 e 105  $\text{kg ha}^{-1}$  de N e  $\text{K}_2\text{O}$ , respectivamente (SOSBAI, 2018). Esta última foi definida considerando-se os resultados da análise química do solo e expectativa alta de resposta da cultura à adubação (SOSBAI, 2018).

Assim como para o experimento 1, este foi delineado em faixas, constituídas por 20 linhas de plantas, espaçadas entre si em 17,5 cm (quatro camalhões com 0,90 m de largura), com 150 m de comprimento. Nas porções superior, intermediária

e inferior das faixas foram distribuídas, ao acaso, quatro repetições dos tratamentos, com 10 m de comprimento. Para todos os tratamentos, os fertilizantes fosfatado e potássico foram aplicados integralmente em pré-semeadura, a lanço em área total. Por sua vez a adubação nitrogenada foi parcelada em pré-semeadura (20 kg ha<sup>-1</sup>) e em cobertura, parcelada em três aplicações nos estádios V4 (50%); V7 (25%) e R0 (25%). Como fontes de nitrogênio e potássio utilizou-se ureia e cloreto de potássio.

### 5.3.2 Condução, avaliação e colheita da cultura do arroz

Da mesma forma, o manejo da cultura do arroz seguiu as indicações técnicas vigentes na região Sul do Brasil (SOSBAI, 2018). A irrigação da cultura também foi semelhante àquela descrita para o experimento 1.

O efeito dos tratamentos foi avaliado separadamente nas unidades experimentais dispostas nos três setores do sulco, superior, intermediária e inferior dos sulcos, que são representativos das condições de solo drenado, saturado e inundado, respectivamente. Abrangeu, ainda, linhas de plantas dispostas nos sulcos de irrigação e nos camalhões.

Os tratamentos foram avaliados pela determinação do estado nutricional da cultura, acompanhamento da produção de matéria seca e da absorção de fósforo pelas plantas, desempenho agrônomo e produtivo; qualidade de grãos e pelo índice de eficiência agrônoma do fertilizante fosfatado.

As amostragens de planta para avaliação do estado nutricional da cultura foram realizadas no florescimento pleno (estádio R4), consistindo na coleta da folha bandeira de 48 plantas por parcela experimental. As amostras coletadas foram secas, moídas e submetidas à análise química, determinando-se os teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal (TEDESCO et al., 1995). Os valores determinados foram utilizados para a comparação do efeito dos tratamentos de manejo da adubação fosfatada para o arroz, bem como contrastados com padrões estabelecidos para a cultura (SOCIEDADE, 2016).

Para a obtenção dos dados de acumulação de massa de matéria seca e de fósforo pelas plantas de arroz utilizaram-se amostras constituídas pelas plantas contidas em 0,5 m de linha de cada unidade experimental. Nos momentos das coletas, foi identificado o estágio de desenvolvimento das plantas de arroz.

O material vegetal colhido foi separado em colmos e folhas e panículas com grãos (para as coletas realizadas após a floração) e, posteriormente, seco em estufa

com circulação forçada de ar, a 65°C, até atingir massa constante. Após, as amostras foram pesadas, moídas e analisadas, para determinação das concentrações de P no tecido vegetal, segundo método descrito em Tedesco et al. (1995).

Com os resultados, foram estabelecidas regressões entre o acúmulo da matéria seca (MS) e o teor de P e os dias após a emergência (DAE), utilizando-se um modelo sigmoidal, com três parâmetros conforme equação:

$$y = y_{\text{máx}} / (1 + \exp(-(x - x_0)/b))$$

onde:

$y$  é a massa de matéria seca ou a quantidade do nutriente na parte aérea da planta de arroz, em  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $x$ , dias após emergência (DAE);

$y_{\text{máx}}$  = parâmetro que delimita o ponto máximo da curva (maior  $y$ );

$x_0$  = valor de  $x$ , em DAE para inflexão da curva; e  $b$  = amplitude no valor de  $x$ , em DAE, em que ocorre a maior variação de  $f$ ;

*Os parâmetros  $a$ ,  $x_0$  e  $b$  foram estimados utilizando-se o software SigmaPlot® v.13.*

Na maturação da colheita, foram realizadas as avaliações das seguintes variáveis: número de perfilhos, número de panículas, estatura da planta, produtividade de grãos e componentes de produtividade do arroz (número de grãos por panícula, esterilidade de espiguetas e massa de 1000 grãos). Foi determinado, também, o rendimento de engenho (grãos inteiros e quebrados).

#### 5.4 Análise estatística

Para análise da normalidade dos dados foi usado o teste de Shapiro-Wilk. Obedecendo aos pressupostos de normalidade os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativa, as médias dos tratamentos serão comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5%. A condução das análises estatísticas e a confecção de gráficos foi feita com suporte do programa estatístico R®.

## 6 Resultados e Discussão

### 6.1. Experimento 1 - Resposta do arroz irrigado por sulco à adubação nitrogenada

#### 6.1.1. Produtividade de grãos

Observou-se significância da interação dos fatores dose de N e posição DSA plantas na lavoura sobre a produtividade de grãos do arroz (Figura 10). Observou-se, para a dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N, que maior produtividade de grãos ocorreu na porção inferior da lavoura de arroz (Figura 11). Possivelmente, devido a essa posição permanecer continuamente sob solo inundado. Desta forma, a cultura não é submetida ao estresse hídrico, além de ocorrerem reações de redução do solo mais intensas, que contribuem para o aumento dos teores de vários nutrientes essenciais na solução do solo (SOUSA et al., 2002).

Já na porção superior, observou-se produtividade de grãos semelhantes as demais porções do sulco, isso pode ser decorrente de uma irrigação intermitente, o que permitiu um maior aproveitamento da água proveniente da irrigação ou das chuvas. Segundo Massey et al. (2014), em experimentos na região do Mississippi/USA, avaliaram a irrigação contínua com o fornecimento intermitente entre as fases fenológicas vegetativa V5+10 dias e reprodutiva R3 (emborrachamento e início da floração), não tendo observado redução da produtividade de híbridos de arroz em relação à irrigação por inundação contínua.

Há uma importante interação entre o manejo da água e as demais práticas da cultura, influenciando na disponibilidade do nitrogênio, sendo nesta variável, a porção e a dose influenciaram positivamente, já que a partir da dose 120 kg ha<sup>-1</sup> na porção inferior, foi onde a cultura expressou sua maior produtividade. Esse aumento é resultado da quantidade de nitrogênio aplicada aliado ao fornecimento de água ideal, refletindo no aumento de número de perfilhos, emissão de panículas e consequentemente no aumento da produtividade de grãos. Na porção superior é nítida a redução da produtividade de grãos de arroz, possivelmente em razão da menor capacidade de suprimento de nutrientes às plantas e a possíveis condições de limitação por água. Este fato demonstra a importância do suprimento adequado

de nitrogênio no desempenho produtivo do arroz (SNYDER e SLATON, 2002; SCIVITTARO e MACHADO, 2004; SCIVITTARO e GOMES, 2006).

Na dose de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N houve uma redução na produtividade de grãos comparado a dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N corroborando resultados encontrado por Hernandez et al. (2010) o fato dos tratamentos com altas doses de N não refletir em aumento da produtividade, esta ligado ao sombreamento, pois altas doses de N estimulam o perfilhamento e a formação de novas folhas, isso causa competição entre as plantas, propicia um microclima favorável ao aparecimento de doenças e acaba diminuindo a produtividade.

De acordo com Freitas (2001; 2007) o nitrogênio estimula o crescimento da panícula do arroz juntamente com o crescimento de novas espiguetas, aumentando assim o número de grãos por planta. No entanto, em alguns casos, a utilização em excesso do nitrogênio pode causar problemas de acamamento por promover grande aumento de índice foliar, o aumento de doenças por toxidez e esterilidade nas espiguetas. (SCHOENFELD, 2010). Também se observou uma maior incidência de plantas daninhas, como buva e capim arroz, excepcionalmente nas partes intermediária e superior da lavoura, onde possivelmente seja pela não formação da lâmina d'água, que é usada para o controle de plantas daninhas.

O uso racional da adubação nitrogenada é fundamental, não somente para aumentar a eficiência de recuperação, mas também para aumentar a produtividade das culturas e diminuir o custo

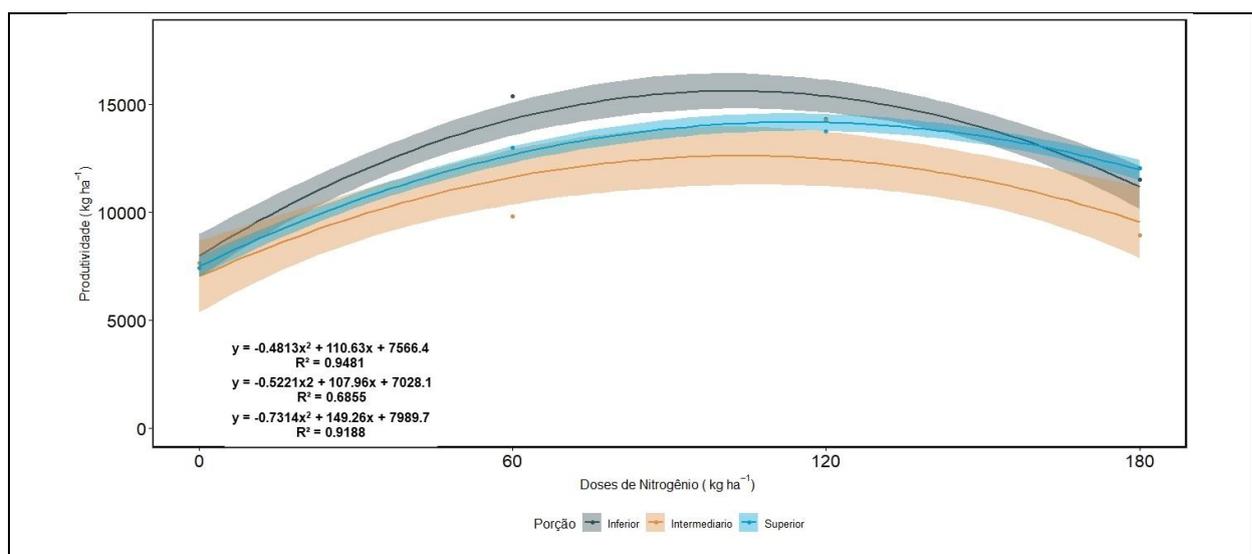


Figura 11 - Produtividade de grãos de arroz irrigado por sulco sob doses de nitrogênio em híbrido de arroz XP 117 em rotação com soja. Estação Experimental RiceTec, Capão do Leão-RS. Bandas indicam o intervalo de confiança a nível de 95% de confiança. Sulcos com 150 m de comprimento e declividade de 0,1%. Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente).

## 6.1.2 Componentes de rendimento do nitrogênio

### 6.1.2.1. Altura de plantas

Dentre as três porções, a parte inferior mostrou um efeito maior na altura de plantas, quando comparado aos demais, evidenciando que com as maiores doses de nitrogênio, não houve um efeito significativo, se mantendo uma estatura constante dentre elas (Figura 12). A altura de planta é sensível à adubação nitrogenada, dado que o N é componente de diversos constituintes celulares e contribui para o crescimento das plantas (SOUZA e FERNANDES, 2006). A altura de planta é considerada uma variável indicadora do crescimento das plantas, sendo normalmente sensível à adubação nitrogenada (MANIKANDAN e SUBRAMANIAN, 2016).

Em condições de déficit hídrico, normalmente as plantas apresentam desenvolvimento vegetativo reduzido. Esse estresse pode atrasar o desenvolvimento fenológico das plantas, com reflexo sobre a estatura (PATEL et al., 2010), isso mostra que devido a porção inferior estar totalmente alagada, a planta apresenta um maior desenvolvimento e crescimento inicial. No entanto, Mauad et al. (2003) verificaram uma redução na altura de planta, quando a dose de N foi aumentada. Com isso, o efeito do N na altura da planta depende de outros fatores como luminosidade, temperatura e umidade.

Fidelis et al. (2016) também constataram diferença significativa entre os ambientes com alto e baixo teor de N, sendo que o ambiente com alto teor de N propiciou maiores médias de altura de planta, evidenciando que nessa variável apenas a porção teve efeito na altura de planta, demonstrando que a dose não interferiu, se mantendo uniforme com os demais.

O nitrogênio tem uma importante função na cultura do arroz, e com isso requer grandes quantidades, por desempenhar importante papel no rendimento do arroz. Com isso o uso deve ser utilizado de maneira criteriosa, como podemos observar na figura 12, quando a dose foi aumentada, não mostrou resultados satisfatórios.

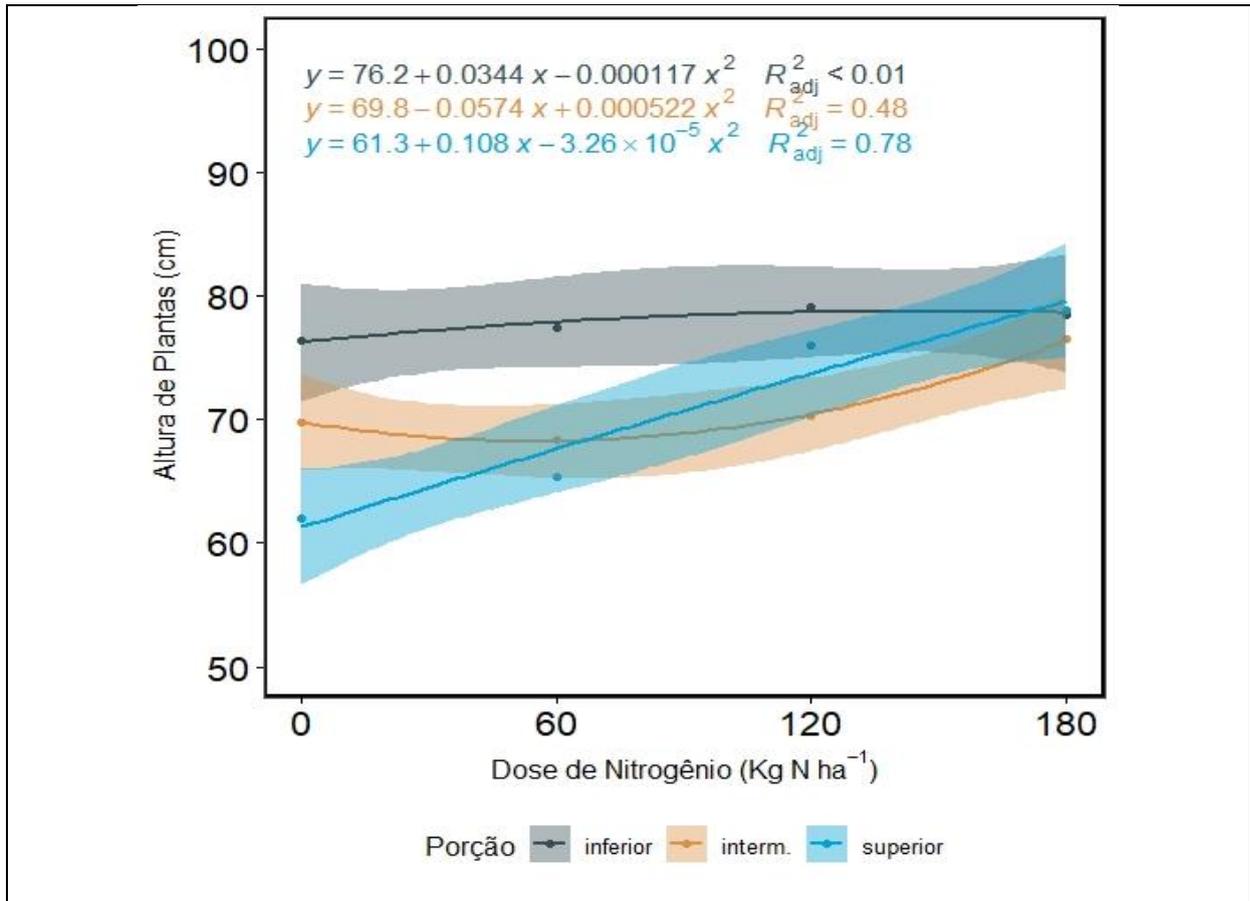


Figura 12 - Estatura da planta de arroz em sistema sulco-camalhão, em rotação com soja, sob diferentes doses de nitrogênio. Híbrido XP 117. Safra 2020/21. Ricetec-Capão do Leão/RS.

#### 6.1.2.2 Grãos por panícula

Na porção inferior, podemos observar que houve um incremento no número de grãos por panícula com o aumento das doses de nitrogênio (entre 60 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de N), devido à cultura não ter sido submetida ao estresse hídrico, favorecendo absorção dos nutrientes (Figura 13). Nesta variável não houve diferença na dose, diferindo minimamente na porção, não mostrando resultados significativos. O N estimula o crescimento do sistema radicular do arroz, e conseqüentemente, favorece o perfilhamento, aumenta o número de espiguetas por panícula e a porcentagem de proteína nos grãos. A adubação nitrogenada aumenta o número de colmos e panículas por área (CAMPELLO JUNIOR, 1985) e o número de espiguetas (FORNASIERI FILHO e FORNASIERI, 1993). Observou-se também que, nas porções superiores e intermediária, não houve diferença no número de grãos por panícula, segundo Tanguilig (1987), o estresse hídrico reduz absorção de nutrientes pelas plantas devido ao decréscimo da transpiração, prejudicando absorção e o

mecanismo de transportes de nutrientes nas raízes. O número de panículas por planta é uma característica importante em cultivares de arroz híbrido, em que se utilizam menores densidades de semeadura (NEVES, 2010).

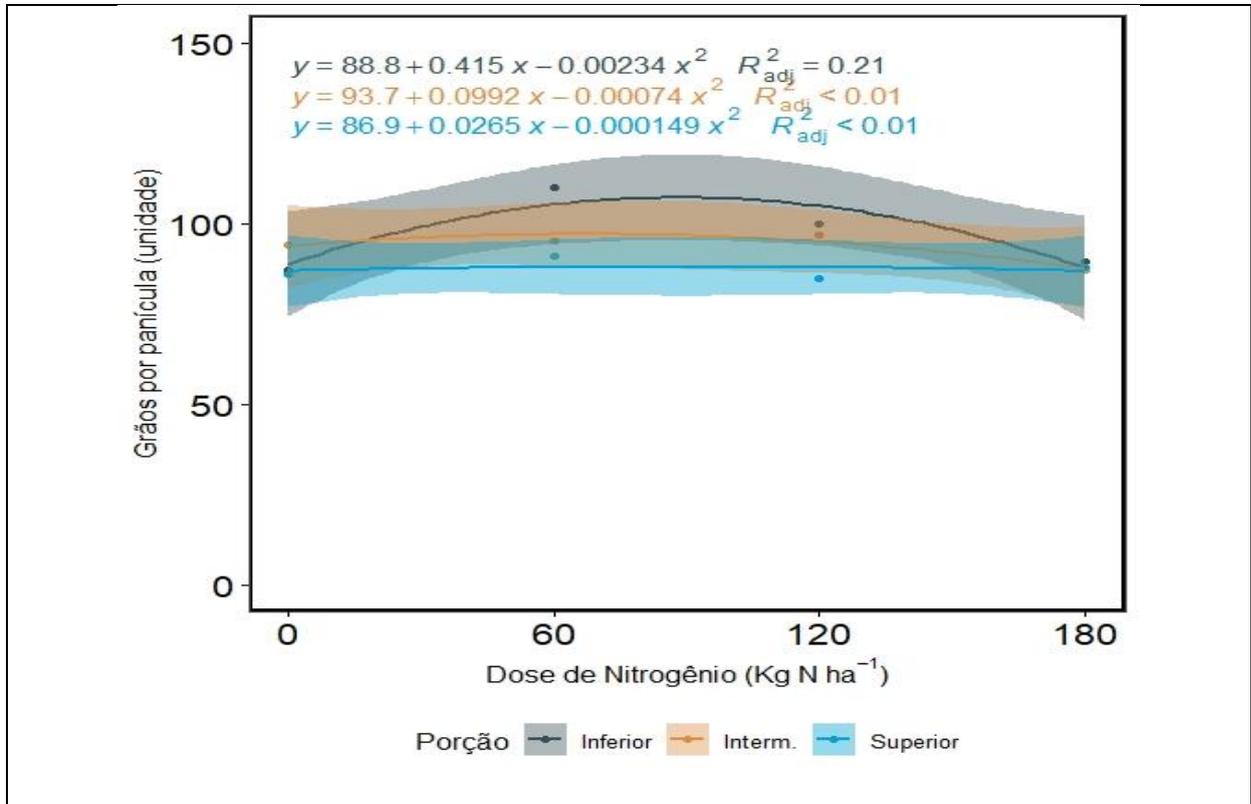


Figura 13 - Número de grãos por panícula (unidade) de arroz em função das doses de nitrogênio, na safra 2020/2021, na Estação Experimental RiceTec, Capão do Leão-RS. Bandas indicam o intervalo de confiança a nível de 95% de confiança.

### 6.1.2.3 Esterilidade de espiguetas

Dentre as variáveis associadas ao desempenho agrônomo e produtivo do arroz, não se observou interação significativa entre dose e porção do sulco para esta variável medida, já que no período reprodutivo, os cereais apresentam maior sensibilidade a estresses bióticos e abióticos (TAIZ e ZEIGER, 2009), como o déficit hídrico do solo e, conseqüente, o estresse hídrico na planta. Pode-se observar também um pequeno aumento na esterilidade de espiguetas decorrente do aumento da dose de nitrogênio (180 kg de N ha<sup>-1</sup>), na porção inferior. Freitas (2001; 2007) observou que o nitrogênio estimula o crescimento da panícula do arroz juntamente com o crescimento de novas espiguetas, aumentando assim o número de grãos por panícula.

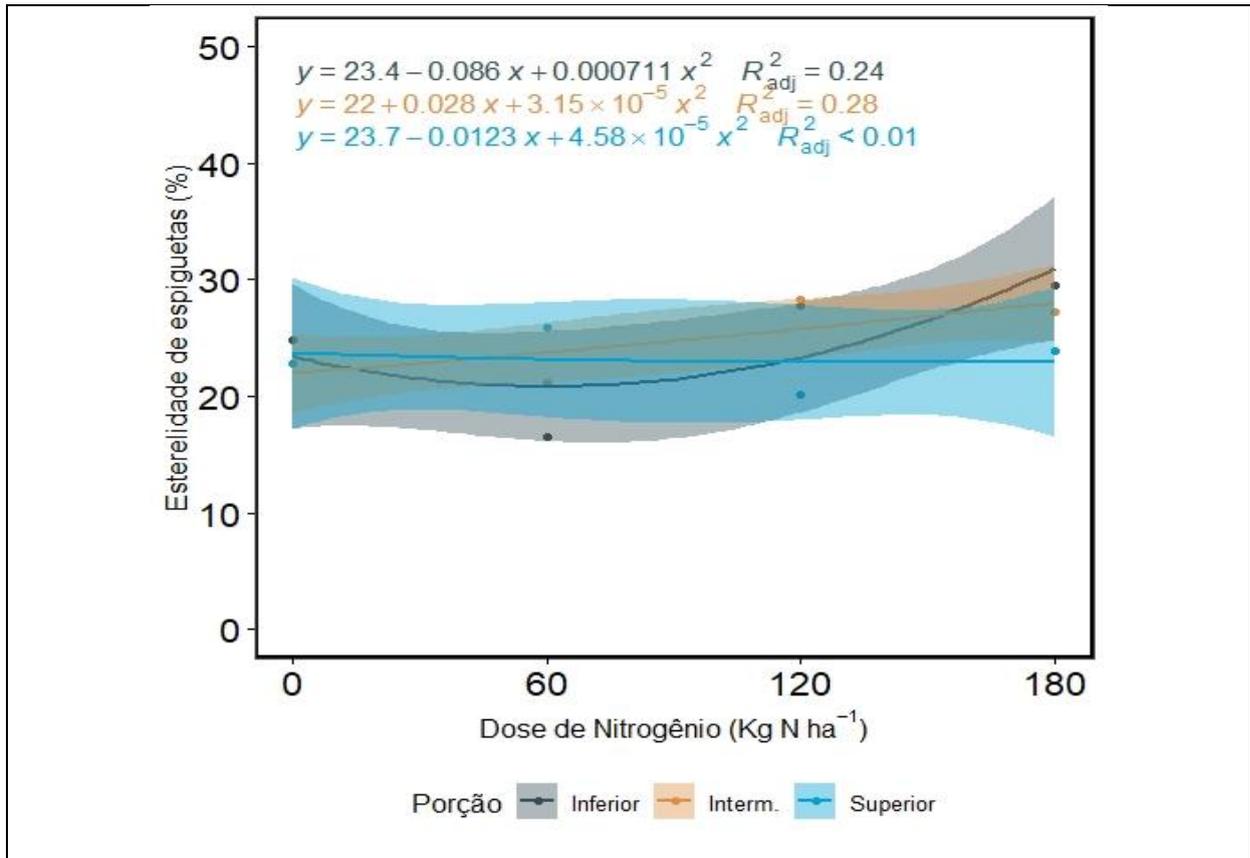


Figura 14 - Análise de regressão das doses de nitrogênio ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e a esterilidade de espiguetas (%) de arroz nas porções Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente), utilizando o híbrido XP 117, na safra 2020/2021. Centro Tecnológico da RiceTec, Capão do Leão, RS.

#### 6.1.2.4 Peso de mil grãos

Não se observou efeito das porções e das doses de N no peso de mil grãos (Figura 15). Observou-se uma tendência de redução de peso de mil grãos na maior dose de nitrogênio ( $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ), evidenciando que o aumento da dose de nitrogênio não propiciou o aumento da massa de mil grãos. Isso pode ocorrer devido ao fato de a planta priorizar o crescimento em altura e o número de perfilhos, redistribuindo os fotoassimilados para as panículas e reduzindo a massa específica do grão, tendo maior produção de grãos por área e menor enchimento de grão.

#### 6.1.2.5 Panículas/m<sup>2</sup>

Na parte superior, onde a variação nas condições de umidade e oxirredução do solo é frequente, determinou-se maior número de panículas e aumento em função da dose de N (Figura 16). O nitrogênio tem capacidade de estimular o perfilhamento e, conseqüentemente, o número de panículas.

Nas porções inferior e intermediária não se observou significância da interação entre a posição da lavoura e dose de nitrogênio.

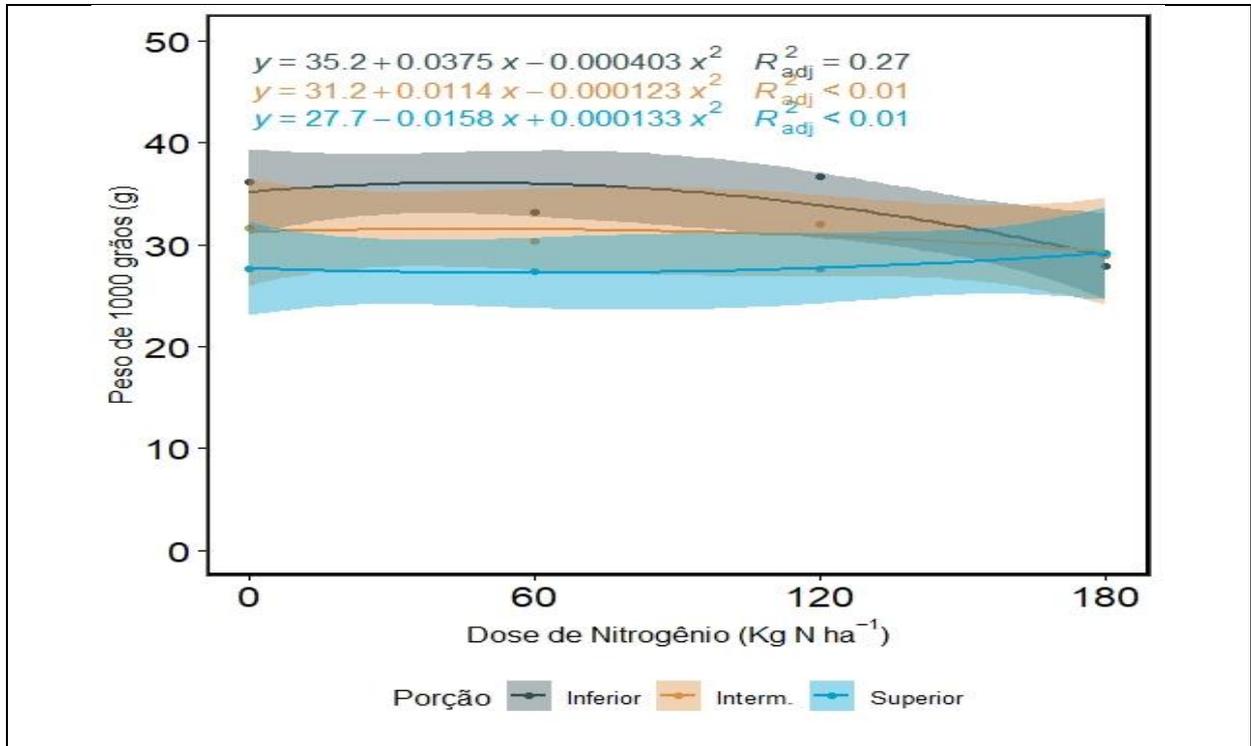


Figura 15 - Análise de regressão linear e intervalo de confiança ( $\alpha=0,05$ ) entre as doses de nitrogênio e o peso de 1000 grãos (g) de arroz nas porções do sulco, superior, intermediária e inferior, na safra 2020/2021. Capão do Leão, RS.

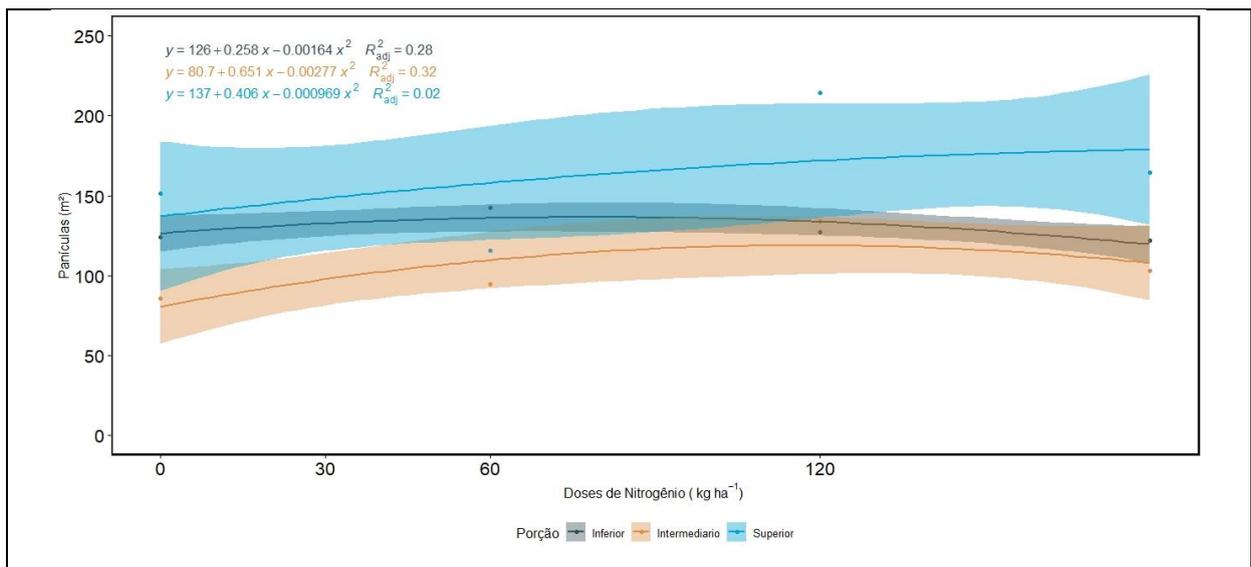


Figura 16 - Panículas por metro quadrado de arroz irrigado no sistema sulco camalhão sob diferentes doses de Nitrogênio (Híbrido XP 117. Safra 2020/2021). CT Ricetec. Capão do Leão-RS.

### 6.1.3 Emissões de gases de efeito estufa

#### 6.1.3.1 Fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> do solo

Nas três porções do sulco de arroz, superior, intermediária e inferior, os picos máximos de emissão de N<sub>2</sub>O ocorreram em sucessão à primeira adubação nitrogenada em cobertura e início da irrigação do arroz por sulco, mantendo-se elevados por cerca de dez dias. Na sequência, os fluxos decresceram rapidamente, ocorrendo em magnitude reduzida, eventualmente alternada com influxos de N<sub>2</sub>O, até realização da segunda cobertura de N, quando novamente determinaram-se alguns picos elevados de emissão de N<sub>2</sub>O, especialmente na porção superior da lavoura de arroz, onde a alternância nas condições de umidade e oxirredução do solo é frequente. A partir desse momento, estendendo-se até o final do ciclo de cultivo do arroz, as emissões de N<sub>2</sub>O do solo foram, de maneira geral, bastante baixa ou mesmo negativas, independentemente da porção da lavoura (Figura 17).

Em sucessão à primeira adubação nitrogenada em cobertura, os picos máximos de emissão de N<sub>2</sub>O corresponderam, respectivamente, a 8.568,5; 3.545,6 e 6.914,6 mg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, nas porções superior, intermediária e inferior da lavoura, tendo ocorrido no 7º dia após a aplicação do fertilizante e primeiro turno de irrigação do arroz (Figura 17). Após a segunda cobertura nitrogenada, os picos de emissão foram de magnitude inferior nas porções superior e intermediária da lavoura, totalizando 3.270,4 e 1.632,8 mg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente. Por outro lado, na porção inferior da lavoura, onde o solo é mantido inundado, esse foi ligeiramente superior, totalizando 6.940,2 mg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Nas três porções da lavoura, as emissões máximas após a segunda cobertura nitrogenada ocorreram já no primeiro dia após a aplicação do fertilizante (Figura 16).

As adubações nitrogenadas proporcionam elevada disponibilidade de N no solo e associadas às mudanças no estado de oxirredução do solo, que favorece a alternância nos processos de nitrificação e desnitrificação, que tem o N<sub>2</sub>O como produto intermediário (SIGNOR, 2010), explicam as elevadas emissões de N<sub>2</sub>O verificadas em sucessão aos eventos de adubação do arroz. Segundo Skiba e Smith (2000), a disponibilidade de N mineral e o conteúdo de água no solo são os principais fatores determinantes dos fluxos de emissão de N<sub>2</sub>O.

Mesmo nas porções superior e intermediária da lavoura de arroz, onde a variação na umidade do solo é maior, as emissões de N<sub>2</sub>O do solo em sucessão à segunda cobertura com N mantiveram-se baixas ou nulas após os picos iniciais,

provavelmente em razão da dinâmica intensa do N no solo e à elevada instabilidade e suscetibilidade a perdas da forma nítrica em áreas sujeitas à inundação, promovendo rápida perda para a atmosfera.

Em cultivos de arroz irrigado por inundação do solo, os fluxos de  $N_2O$  são normalmente baixos (IIDA et al., 2007; LIU et al., 2010), podendo, inclusive, ser negativos, caracterizando absorção de  $N_2O$  pelo solo (HOU et al., 2000). A absorção de  $N_2O$  ocorre pela ação de bactérias desnitrificadoras, que reduzem o  $N_2O$  a nitrogênio molecular ( $N_2$ ) em condições anaeróbicas. Nessa condição, pela ausência de nitrato ( $NO_3^-$ ), os microrganismos nitrificadores utilizam o  $N_2O$  como substrato, consumindo-o (CHAPUIS-LARDY et al., 2007). No sistema irrigado por sulco, apesar da maior variabilidade nas condições de oxirredução do solo, particularmente nas porções superior e intermediária da lavoura, esse efeito também foi verificado, ainda que em menor magnitude, indicando a adequação do manejo do nitrogênio para a cultura praticado, caracterizado pela aplicação parcelada do nutriente nos momentos de demanda elevada da cultura, preferencialmente antecedendo a irrigação, minimizando as emissões de  $N_2O$  do solo.

Importante destacar, também, que em todas as três porções da lavoura de arroz, as emissões de  $N_2O$  após a segunda cobertura nitrogenada foram menores que o período após a primeira adubação nitrogenada de cobertura. Este fato pode se explicar em razão do início da fase reprodutiva do arroz ser um período em que a demanda de nitrogênio é muito elevada, sendo rapidamente absorvido, reduzindo sua suscetibilidade a perdas do sistema solo-planta (WILSON et al., 1998; NORMAN et al., 2002).

Embora a produção de  $N_2O$  tenha sido atribuída durante muito tempo à desnitrificação, estudos mais recentes indicam que, sob determinadas condições ambientais, a nitrificação também pode contribuir à produção e emissão desse gás de efeito estufa, podendo atingir até 30% da quantidade total de  $N_2O$  emitida. Ambos os processos são microbiologicamente dirigidos e apresentam estreita relação com o nível de  $O_2$  presente no solo, o qual pode ser expresso por uma medida física que é o EPISA (Figura 17a). Observa-se que a partir de valores de EPISA de 30 % a taxa respiratória aumenta, conforme indicado pelo aumento no consumo de  $O_2$ , atingindo atividade relativa máxima em valores de EPISA de 60 %. Nessa faixa de aeração do solo aumenta também, de modo praticamente linear, a atividade relativa da nitrificação. A partir de valores de EPISA superiores a 60% diminuem a nitrificação,

como resultado da diminuição da disponibilidade de  $O_2$  e aumenta a atividade relativa das bactérias desnitrificadoras, com taxas maiores a partir de EPSA superior a 80 %.

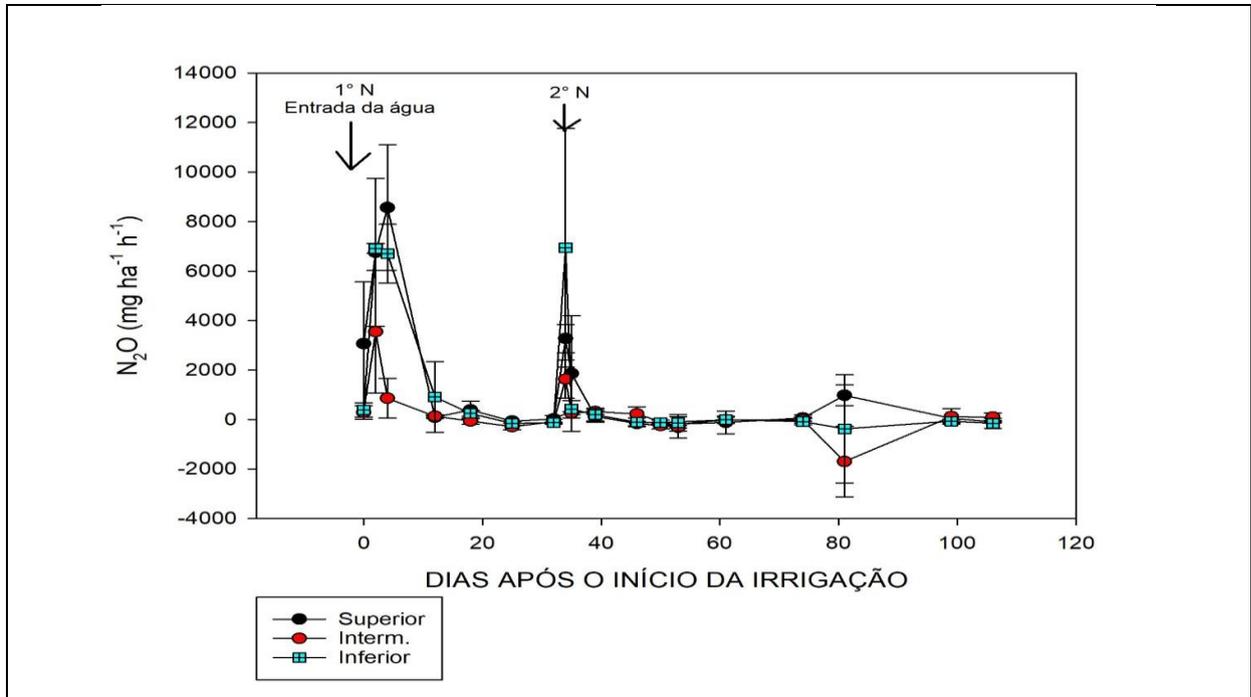


Figura 17a - Fluxos de  $N_2O$  de solo cultivado com arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Setas verticais indicam a época de realização das adubações nitrogenadas em cobertura. Centro tecnológico Ricetec. Capão do Leão-RS. Safra 2020/2021.

A produção de  $N_2O$  durante a nitrificação ocorre quando a disponibilidade de  $O_2$  no solo se encontra abaixo de um nível ótimo às bactérias oxidantes de  $NH_3$ . Nessa condição elas utilizam o  $NO_2^-$  como receptor de elétrons reduzindo-o a  $NO$  e posteriormente em  $N_2O$ , que pode ser emitido para a atmosfera (Figura 17b). Isso quer dizer que as mesmas bactérias que realizam a oxidação da  $NH_3$  podem desnitrificar, tornando-se efetivamente nitrificadores desnitrificantes. Aliado a esse processo pode ocorrer a produção de  $N_2O$  na nitrificação a partir da decomposição química de  $NH_2OH$  gerada na primeira etapa da oxidação da  $NH_3$ . A nitrificação também tem influência direta na produção de  $N_2O$  na desnitrificação heterotrófica pela produção de  $NO_3^-$ , o qual é utilizado como receptor de elétrons pelas bactérias desnitrificadoras. Quando o  $NO_3^-$  produzido pelas nitrificadoras oxidantes de  $NO_2^-$  é imediatamente desnitrificado in situ por bactérias desnitrificadoras caracteriza-se o processo da nitrificação acoplada à desnitrificação.

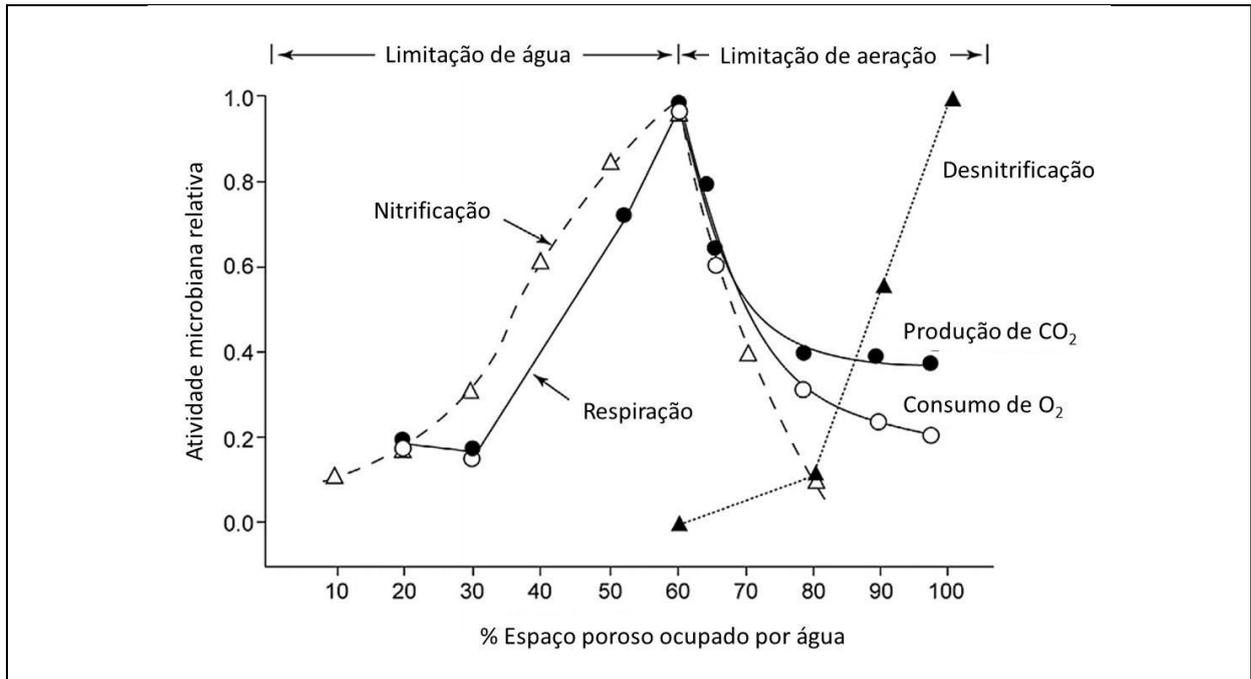


Figura 17b. Relação entre o espaço poroso do solo ocupado por água (EPSA) e a atividade microbiana relativa. Adaptado de Linn and Doran (1984).

A contribuição relativa dos processos de nitrificação e desnitrificação na produção de N<sub>2</sub>O é baseada na relação dos mesmos com os valores de EPSA no solo, conforme indica a Figura 17b, onde aparecem as diferentes formas gasosas de N emitidas durante os dois processos. Estudos recentes, usando o isótopo <sup>15</sup>N, confirmam as curvas clássicas de produção de N<sub>2</sub>O a partir da nitrificação e da desnitrificação, em função da umidade do solo (EPSA). Para valores de EPSA inferiores a 53% a proporção de N<sub>2</sub>O oriunda da nitrificação predomina, porém acima deste valor ela diminui com o aumento da umidade do solo, até valores de EPSA de 78%. Simultaneamente, a partir de valores de EPSA de 53% aumenta a contribuição da desnitrificação na produção de N<sub>2</sub>O. Acima de valores de EPSA de 78% a desnitrificação é o processo totalmente dominante.

Com relação aos fluxos de CH<sub>4</sub> associados ao cultivo de arroz irrigado por sulco, esses variaram de -15,5 a 255,6 g CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, na porção superior, de -51,7 a 75,0 g CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, na porção intermediária, e de 2,0 a 246,6 g CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, na porção inferior da lavoura (Figura 18). As emissões de CH<sub>4</sub> medidas no presente estudo foram bem inferiores àquelas determinadas em cultivos de arroz irrigado por inundação do solo desenvolvidos no Rio Grande do Sul, correspondendo aos

intervalos de  $-0,08$  a  $629,5 \text{ g ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ CH}_4$  (ZSCHORNACK, 2011) e  $-0,62$  a  $422,22 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ CH}_4$  (VEÇOZZI, 2015).

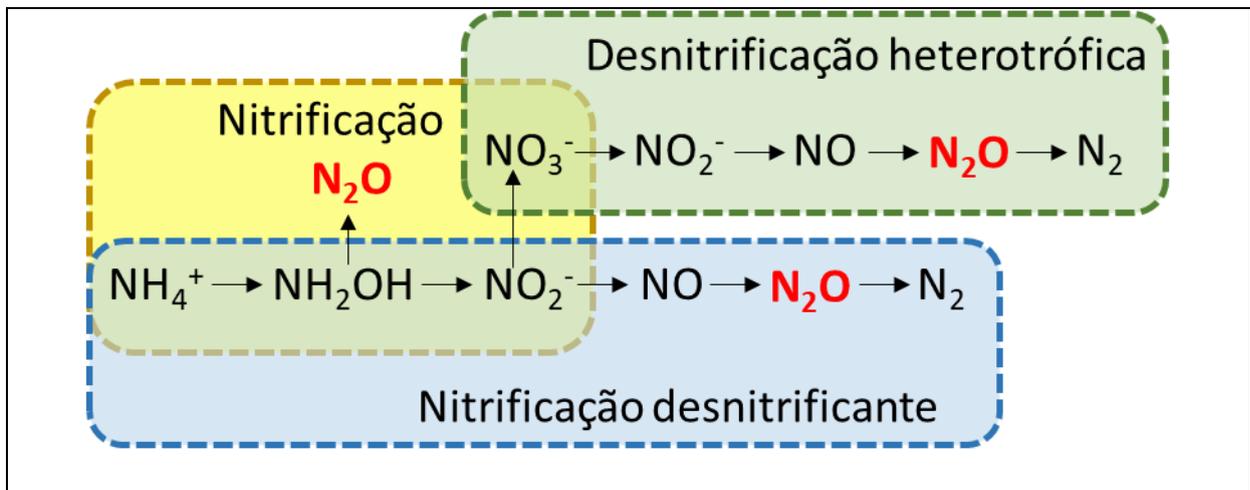


Figura 17c - Produção de  $\text{N}_2\text{O}$  durante os processos microbianos de nitrificação e desnitrificação. Adaptado de Davidson (1991).

Na porção superior da lavoura, onde o solo é mantido com menor conteúdo de água, o primeiro pico de emissão de  $\text{CH}_4$  ocorreu, apenas, cerca de 30 dias após o início dos ciclos de irrigação do arroz por sulco, correspondendo a  $76,1 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ; decrescendo nos 20 dias subsequentes. Após, os fluxos de emissão de  $\text{CH}_4$  elevaram-se novamente até alcançarem o valor máximo, de  $255,5 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , no 75º dia após o início da irrigação (DAI) do arroz, coincidindo com a fase de florescimento da cultura. A partir de então, os fluxos de  $\text{CH}_4$  decresceram abruptamente, mantendo-se em patamar reduzido (inferiores a  $15 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) até o final do ciclo da cultura (Figura 18). De forma geral, os picos de emissão de  $\text{CH}_4$  nessa porção da lavoura de arroz, onde a umidade do solo é menor, estiveram associados a eventos de chuva próximos de irrigações (Figura 7), contribuindo para a redução do solo.

O comportamento dos fluxos de  $\text{CH}_4$  observado na porção intermediária da lavoura, onde o solo é mantido saturado ao longo do período de irrigação, foi o mais estável entre as três porções da lavoura avaliadas, caracterizando-se por emissões constantes de baixa magnitude ao longo de todo o período de irrigação da cultura, eventualmente alternada por eventos de influxo de  $\text{CH}_4$ , no 44º e 114º DAI; o pico máximo de emissão de  $\text{CH}_4$  correspondeu a  $75,0 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , ocorrendo 65 DAI, ou seja, cerca de uma semana antes da floração. O manejo da irrigação com manutenção do solo saturado normalmente retarda o início das emissões de  $\text{CH}_4$  do

solo, dado que a ausência de lâmina de água sobre o solo resulta em processo de redução mais lento, comparativamente ao solo inundado (WESZ, 2011).

Por sua vez, na porção inferior da lavoura, onde o solo é mantido inundado durante o período de irrigação, ocorreu maior emissão de CH<sub>4</sub>, relativamente às seções superior e intermediária da lavoura. Os fluxos atingiram valores significativos a partir do 23º DAI, elevando-se até o 37º DAI, quando atingiram o primeiro pico de magnitude elevada (132,6 g CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), mantendo-se em patamar um pouco inferior até o 44º DAI, caindo no 51º DAI e voltando a se elevar até atingir o valor máximo no 65º DAI. A partir daí, as emissões mantiveram-se em patamares médios até a colheita do arroz, caindo abruptamente na última coleta, realizada cerca de uma semana após esse evento (Figura 18).

Em todas as três porções do sulco, as emissões máximas de CH<sub>4</sub> ocorreram durante a fase reprodutiva, entre a pré-floração e o florescimento pleno, ou seja, do 58º ao 65º dia após o início dos ciclos de irrigação do arroz (Figura 18), quando os compostos inorgânicos presentes no solo já se encontram reduzidos (BAYER et al., 2015), favorecendo a metanogênese. Emissões elevadas de CH<sub>4</sub> na fase reprodutiva do arroz resultam das condições ambientais favoráveis à atividade metanogênica (TOWPRAYOON et al., 2005). Tais condições incluem o pH do solo próximo a 6,0, forte condição de anaerobiose no solo sob alagamento, disponibilidade de nutrientes oriundos da exsudação radicular (PUSATJAPONG et al., 2003) e alta capacidade de transporte de CH<sub>4</sub> pelas plantas de arroz (AULAKH et al., 2000). A atividade fotossintética elevada das plantas de arroz nessa fase aumenta a liberação de exsudatos radiculares, que constituem substrato para os metanogênicos (AULAKH et al., 2000). Resultados semelhantes foram obtidos por Zschornack (2011); Wesz (2011) e Veçozzi (2019), em trabalhos realizados no Rio Grande do Sul.

Após atingirem o pico máximo, as emissões de CH<sub>4</sub> diminuíram bastante em todas as três seções da lavoura de arroz (Figura 18), possivelmente devido à redução progressiva da atividade fotossintética e senescência das raízes, dificultando a difusão do CH<sub>4</sub> até a atmosfera (CAI et al., 1997). O declínio nas emissões de CH<sub>4</sub> durante a fase de maturação se deve à redução na taxa fotossintética e na permeabilidade da camada da epiderme radicular (NOUCHI et al., 1990; TYAGI et al., 2010).

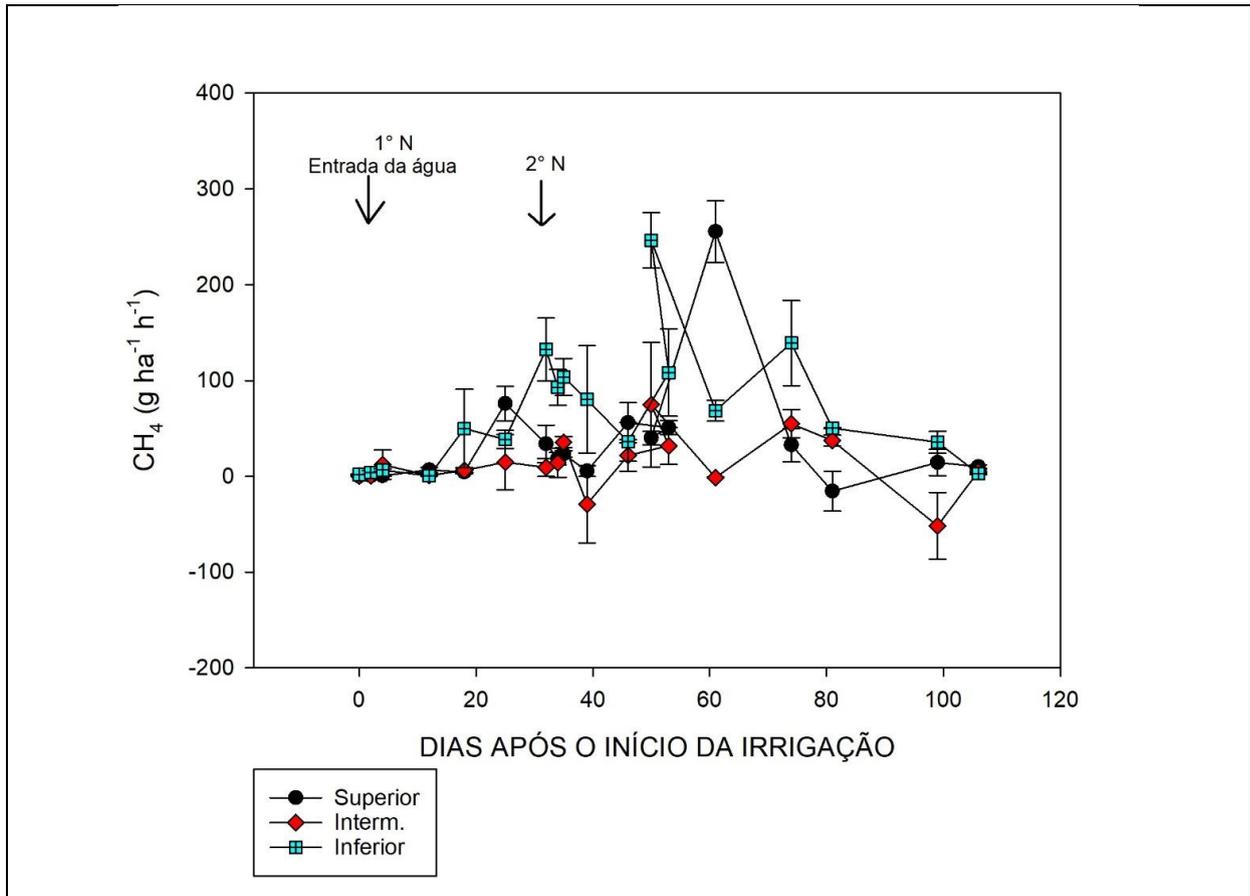


Figura 18 - Fluxos de CH<sub>4</sub> de solo cultivado com arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Setas verticais indicam a época de realização das adubações nitrogenadas em cobertura. Centro tecnológico Ricetec. Capão do Leão-RS. Safra 2020/2021.

### 6.1.3.2 Emissões sazonais de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> do solo

Não se determinou efeito da posição na lavoura de arroz irrigado por sulco sobre as emissões totais de N<sub>2</sub>O. Em todas as três posições as emissões medidas de N<sub>2</sub>O foram bastante baixas (Figura 19), inclusive na porção superior, onde a variabilidade na umidade e potencial de oxirredução do solo poderia ter favorecido a emissão de N<sub>2</sub>O, como produto intermediário dos processos de nitrificação e desnitrificação.

É comum em cultivos de arroz irrigado por inundação do solo que as perdas de N<sub>2</sub>O sejam baixas (VEÇOZZI, 2015; 2019; WESZ, 2011). Esse comportamento repetiu-se no cultivo de arroz irrigado por sulco, demonstrando que, sob manejo adequado da adubação nitrogenada, é possível minimizar as emissões de N<sub>2</sub>O do solo, mesmo sob condições favoráveis à alternância dos processos de nitrificação e desnitrificação. Nesse sentido, ressalta-se que a aplicação da fertilização

nitrogenada para o arroz foi feita de forma parcelada, manejo que é recomendado na região Sul do Brasil, com vistas a otimizar a utilização do nutriente pelo arroz e minimizar as perdas do sistema solo-planta.

As emissões sazonais de  $N_2O$  totalizaram  $1,96 \pm 0,69 \text{ kg ha}^{-1}$ ;  $-0,12 \pm 0,33 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $1,39 \pm 0,49 \text{ kg ha}^{-1}$ , nas porções superior, intermediária e inferior da lavoura de arroz irrigado por sulco, respectivamente (Figura 19).

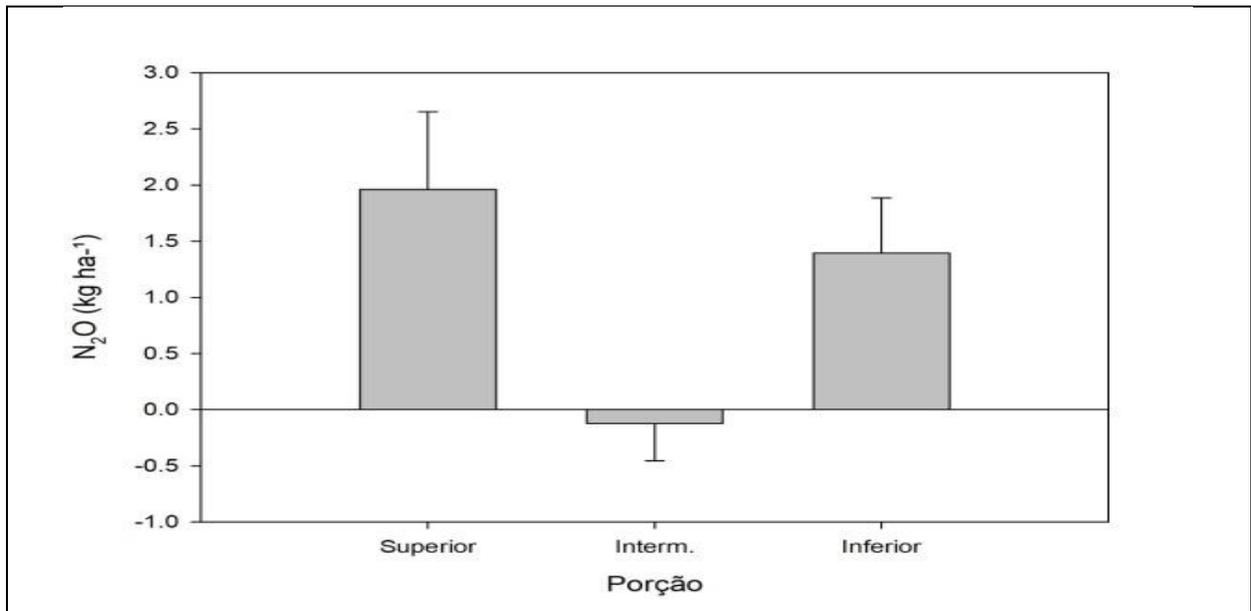


Figura 19 - Emissão sazonal de  $N_2O$  em cultivo de arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Centro tecnológico Ricetec. Capão do Leão-RS. Safra 2020/2021.

As emissões sazonais de  $CH_4$  do solo decresceram na seguinte ordem: porção inferior da lavoura ( $164 \pm 18 \text{ kg ha}^{-1}$ ) > porção superior ( $119 \pm 11 \text{ kg ha}^{-1}$ ) > porção intermediária ( $26 \pm 33,8 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 20). Quanto a esse resultado, surpreende o fato de menores emissões de  $CH_4$  terem ocorrido na porção intermediária da lavoura, onde o solo é mantido saturado, ou seja, com maior conteúdo de umidade que na porção superior, onde na maior parte do tempo o solo se encontra drenado, condição essa não favorável à metanogênese. Entretanto, há que se considerar a ocorrência nessa porção da lavoura de vários picos relativamente elevados de emissão de  $CH_4$  ao longo do período de cultivo de arroz, justificando a superioridade na emissão total de  $CH_4$  do solo. Possivelmente, esses picos de emissão de  $CH_4$  estejam associados às chuvas frequentes ocorridas ao longo da safra agrícola 2020/2021, elevando transitoriamente o conteúdo de umidade do solo no interior dos coletores nessa porção da lavoura, especialmente em sucessão às irrigações.

Observou-se que as porções superior e intermediária apresentaram redução de 27% e 84% nas emissões sazonais de CH<sub>4</sub> em relação à porção inferior da lavoura (solo inundado), indicando efetividade do sistema de irrigação por sulco na mitigação das emissões de CH<sub>4</sub> do arroz, caracterizando um benefício potencial desse sistema de irrigação.

Os sistemas de irrigação que contemplam drenagem do solo, intermitência da irrigação, redução no período de irrigação ou mesmo a redução/eliminação na lâmina de irrigação proporcionam, via de regra, redução nas emissões de CH<sub>4</sub> do solo (CAI et al., 1997), em relação à inundação contínua, o mesmo se aplicando ao sistema de irrigação por sulco.

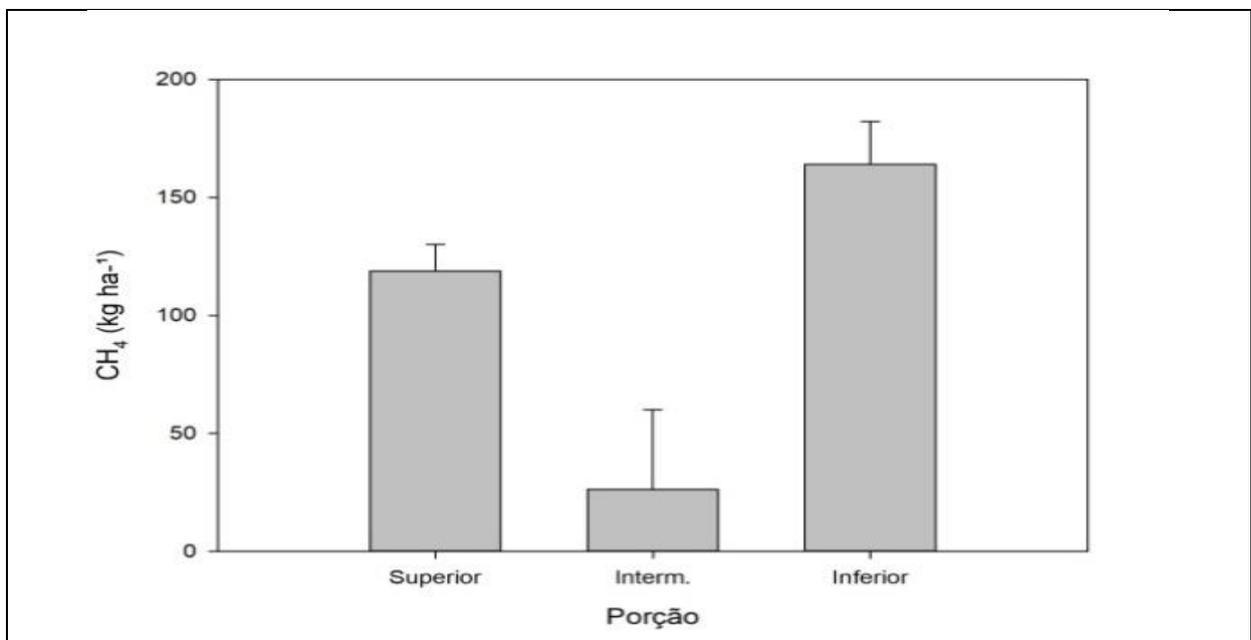


Figura 20 - Emissão sazonal de CH<sub>4</sub> em cultivo de arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Centro tecnológico Ricetec. Capão do Leão-RS. Safra 2020/2021.

Independentemente da porção da lavoura considerada, as emissões totais de CH<sub>4</sub> medidas no cultivo de arroz irrigado por sulco foram inferiores às determinadas em lavouras de arroz irrigado por inundação do solo estabelecidas no mesmo solo e região de cultivo (SCIVITTARO et al., 2017, 2019; VEÇOZZI, 2019), que normalmente variam entre 300 e 400 kg ha<sup>-1</sup>, reforçando o potencial mitigador de emissão de CH<sub>4</sub> do sistema irrigado por sulco.

#### 6.1.3.3 Potencial de aquecimento global parcial (PAGp)

Na Figura 21 são apresentados os resultados do potencial de aquecimento global parcial (PAGp) determinados para o cultivo de arroz irrigado por sulco.

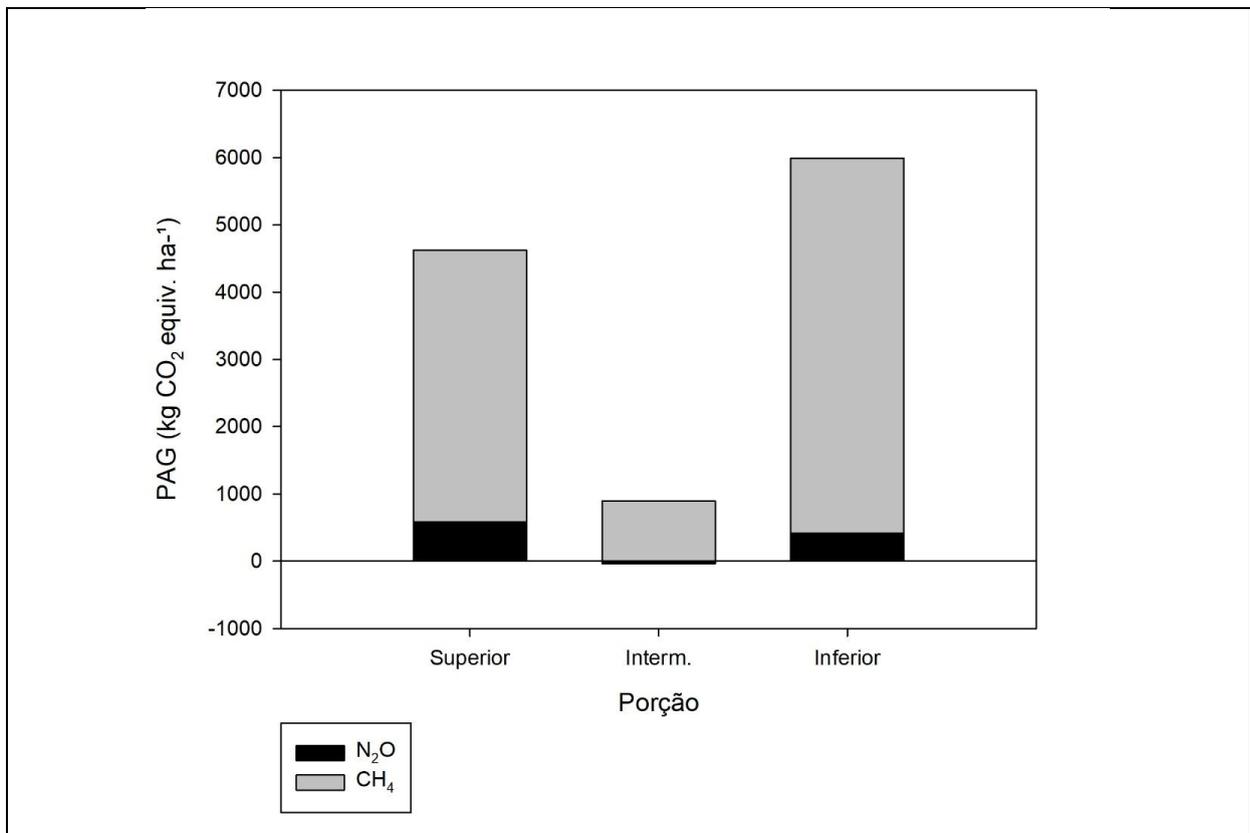


Figura 21 - Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) em cultivo de arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Centro tecnológico Ricetec. Capão do Leão-RS. Safra 2020/2021.

Em razão das baixas emissões totais de N<sub>2</sub>O (Figura 19), para todas as três porções da lavoura de arroz irrigado por sulco, o CH<sub>4</sub> respondeu pela maior parte do PAGp, correspondendo a 87%; 100% e 93% do total para as porções superior, intermediária e inferior, respectivamente. Destaca-se que, na porção intermediária da lavoura, em razão da ocorrência de absorção de N<sub>2</sub>O, o CH<sub>4</sub> respondeu pela totalidade do PAGp associado ao cultivo de arroz. De acordo com Linquist et al. (2012); ZHANG et al. (2016), o PAGp emitido em sistemas de produção de arroz irrigado é constituído principalmente por CH<sub>4</sub>, que normalmente responde entre 85% e 99% do total.

O potencial de aquecimento global parcial da seção inferior da lavoura de arroz, onde o solo é mantido inundado, totalizou 5.992 kg CO<sub>2</sub> equiv. ha<sup>-1</sup>, superando o PAGp das porções superior (4.625 kg CO<sub>2</sub> equiv. ha<sup>-1</sup>) e intermediária (865 kg CO<sub>2</sub> equiv. ha<sup>-1</sup>), com solo úmido e saturado, respectivamente, o que

representa reduções de 23% e 86% no PAGp comparativamente à porção inferior, com solo inundado. A adoção de manejos da água que proporcionam redução na umidade do solo diminui consideravelmente o potencial de aquecimento global da lavoura de arroz (HADI et al., 2010; ZSCHORNACK, 2011; WESZ, 2011), corroborando os resultados obtidos no presente estudo.

#### 6.1.4 Volatilização de amônia

##### 6.1.4.1 Taxa de volatilização diária de amônia

A primeira adubação (Figura 22a) apresentou a maior taxa de volatilização diária ocorreu dois dias após a primeira aplicação em cobertura, onde o arroz estava em estágio fenológico V3, considerando o início da irrigação, e o local do sulco (parte inferior), estar totalmente alagada, sendo ela muito baixa neste sistema de irrigação por sulco, quando comparada ao sistema de irrigação por inundação.

O aumento da umidade contribuiu com a atividade da uréase que depende destes dois fatores para ocorrer as maiores perdas. Na parte superior, onde o solo possui baixa umidade, ocorreu uma perda significativa, devido há dois dias anterior a aplicação, ter ocorrido uma chuva sobre o solo bem seco, que intensificou a umidade do solo. Na segunda adubação (Figura 22b), o maior pico ocorreu no segundo dia após aplicação (R0), na parte inferior, onde estava totalmente estabelecida a lâmina d'água. Em ambas as adubações, após o quarto dia as perdas foram desprezíveis, independente do local do sulco. Scivittaro et al. (2004) verificaram perdas de amônia da ordem de 20% quando a ureia foi aplicada em um Planossolo hidromórfico seco (~70% da capacidade de campo) seguido de alagamento 10 dias após a adubação nitrogenada que, praticamente, cessou a volatilização de amônia. As baixas perdas por volatilização de amônia são atribuídas, principalmente, ao fato de o aumento do pH ao redor dos grânulos de ureia, durante a sua hidrólise, ter sido tamponado pelos íons  $H^+$  existentes no solo (SAVANT et al., 1987; ERNANI, 2008).

No início da fase reprodutiva, a eficiência de absorção de N pelas plantas de arroz é bem maior que início do perfilhamento, visto que apresentam sistema radicular bem desenvolvido localizado na camada superficial do solo, favorecendo a rápida absorção do N aplicado e, portanto, minimizando as perdas de  $NH_3$  (NORMAN et al., 2003).

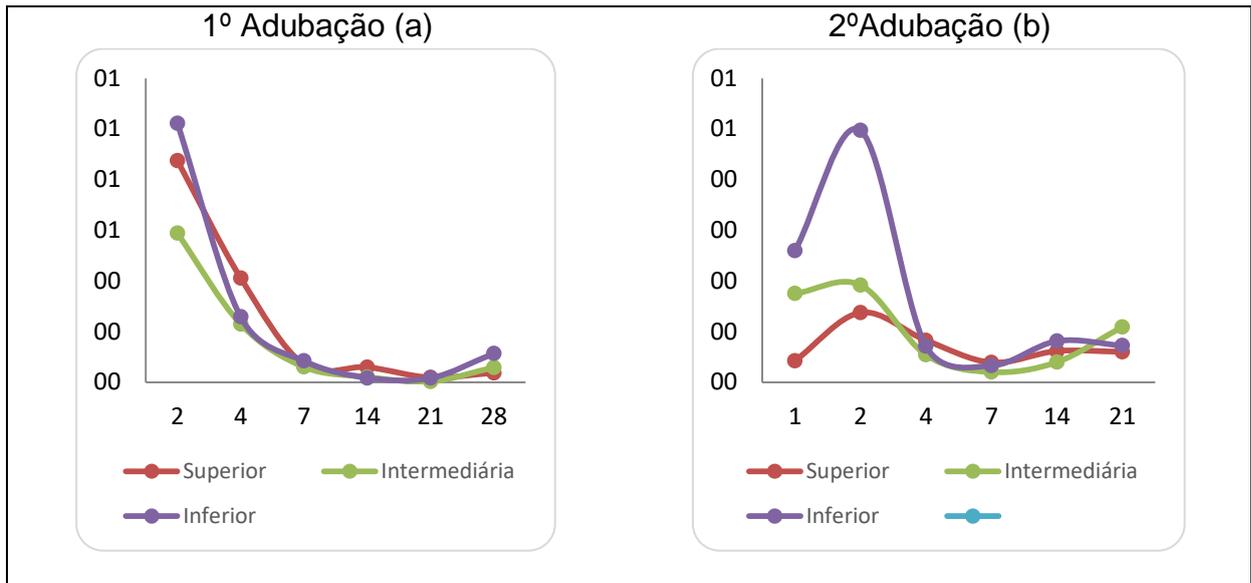


Figura 22 - Taxa diária de volatilização de amônia derivada da ureia em cultivo de arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Avaliação realizada após a primeira (a) e segunda (b) adubação nitrogenada em cobertura. Centro tecnológico Ricetec. Capão do Leão-RS. Safra 2020/2021.

#### 6.1.4.2 Perdas acumuladas por volatilização de amônia

Na primeira aplicação de ureia, a perda acumulada (Figura 23a) se mostrou mais intensa na parte inferior, onde estava totalmente alagada, aumentando gradativamente até os 28 dias após a primeira aplicação. Considerando que na segunda adubação nitrogenada de cobertura (Figura 23b) foi aplicado 40% da dose total e a cultura já estava com irrigação estabelecida, a parte inferior teve uma perda acumulada ao longo de 21 dias, sendo o pico maior ao final do monitoramento.

Além disso, em áreas de terras baixas, o solo pode estar com umidade em nível de saturação na primeira aplicação de N em cobertura, impedindo a incorporação efetiva da ureia pela água de irrigação, favorecendo as perdas por volatilização de amônia. Este fato possivelmente ocorreu nas partes intermediária e superior, onde se observou valores de emissão consideráveis. Isto pode ser devido às práticas de manejo da cultura pH, temperatura, umidade e taxa de evaporação, influenciando diretamente na perda de N por volatilização de amônia.

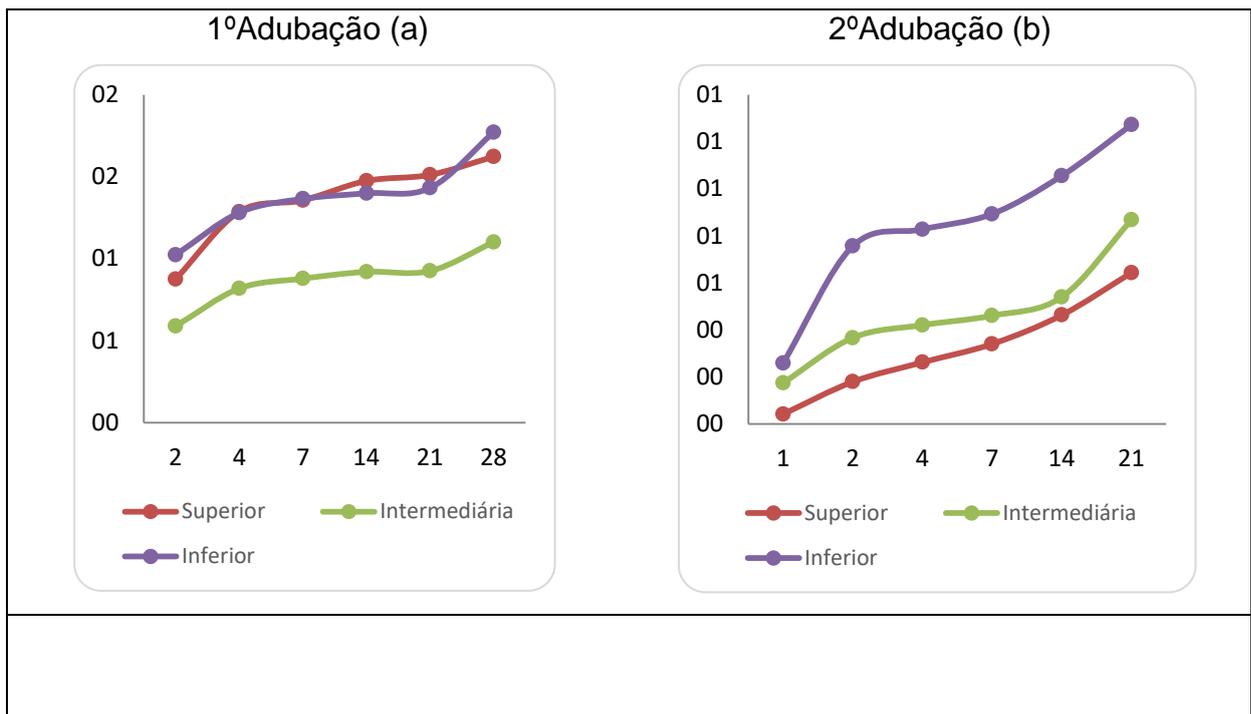
Segundo Mielniczuk (1970), estudando o efeito de sistema de irrigação (alagamento) com diferentes épocas de drenagem durante o ciclo do arroz, observou que grande parte do N foi perdida do solo através dos ciclos de alagamento e drenagem, afetando sensivelmente o rendimento da cultura. De acordo com Buresh et al. (2008), as perdas por volatilização são intensificadas com o aumento da

temperatura e do pH, dois fatores que ocorrem na irrigação contínua, sendo assim, o manejo da irrigação por sulco pode ser uma alternativa para mitigar esse processo de perda.

Observou-se na primeira aplicação (Figura 23c) um pico maior na parte superior ao longo do ciclo de monitoramento. Possivelmente a aplicação da ureia após uma chuva seguido do início da irrigação contribuiu para este maior pico. No entanto, como o solo estava saturado, a difusão do gás para atmosfera foi mais intenso em razão da urease ser dependente da umidade do solo. Em solo seco, a ureia pode permanecer estável, mas a taxa de hidrólise aumenta conforme o teor de água do solo se eleva, até que atinja 20 %, a partir desse ponto, a taxa de hidrólise é pouco alterada pelo teor de água (BREMNER e MULVANEY, 1978).

Comportamento distinto foi verificado, porém, quando a ureia foi aplicada com dez dias de antecedência do início da irrigação do arroz (Figura 23d), onde o NBPT reduziu as perdas de  $\text{NH}_3$  em 88% e 83% relativamente à ureia comum em solo úmido e saturado, respectivamente (SCIVITTARO et al., 2010).

A intermitência também influencia os processos de transformação e perdas de nitrogênio (BURESH et al., 2008), aumentando a importância e a necessidade de avaliar as respostas da cultura ao manejo da irrigação e do nitrogênio, sendo a irrigação por sulco uma alternativa para diminuir esse processo de perda.



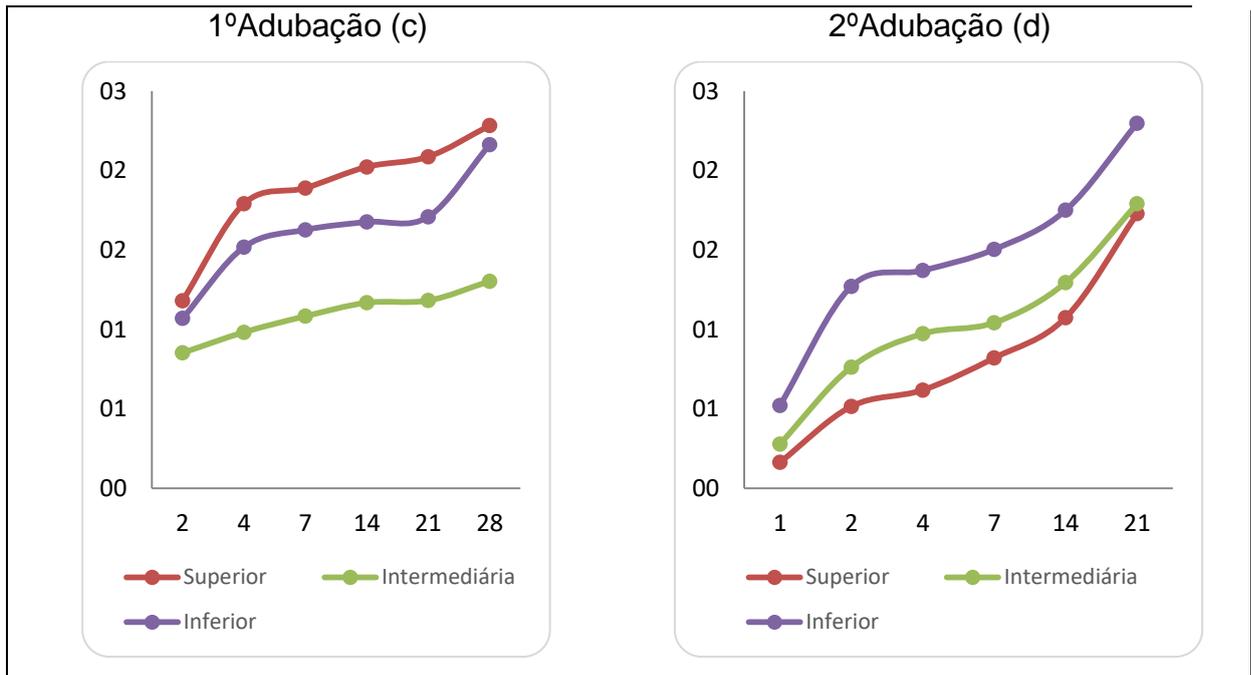


Figura 23 - Perdas acumuladas (%) de nitrogênio como amônia (N-NH<sub>3</sub>) volatilizada (kg ha<sup>-1</sup>) (Figura a; b) e (Figura c, d), derivada da aplicação de ureia à cultura de arroz irrigado por sulco, em função da posição da lavoura ao longo dos sulcos de irrigação (superior – solo úmido, intermediária – solo saturado e inferior – solo inundado). Avaliações realizadas após a primeira (a) e segunda (b) adubação nitrogenada em cobertura. Centro tecnológico Ricetec. Capão do Leão-RS. Safra 2020/2021.

## 6.2 Experimento 2- Resposta do arroz irrigado por sulco à adubação fosfatada: efeito sobre a nutrição e desempenho produtivo

### 6.2.1 Produtividade de grãos

Em relação a reposta ao fósforo, observou-se que nas doses próximas a 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na porção inferior, houve uma maior produtividade de grãos (Figura 24), devido o alagamento controlar a disponibilidade de P nos solos sofrer modificações significativas, havendo aumento da disponibilidade para as plantas, tanto pelo aumento da concentração de P na solução do solo (FAGERIA et al., 2011) como pela sua maior difusão em direção às raízes, em virtude da máxima umidade volumétrica nos solos alagados (COSTA et al., 2008).

Nas partes intermediarias e superior, onde ambas estavam sazonalmente alagadas, apresentaram menor produtividade, devido à tendência desse elemento de formar compostos estáveis de alta energia de ligação e baixa solubilidade com a fase sólida mineral do solo, principalmente com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (GUILHERME et al., 2000).

Segundo Barberena et al.(2011), em solos anteriormente cultivados, dificilmente se observa elevação na produtividade de grãos da cultura com a adição de fósforo. Além disso, as plantas híbridas se mostraram com uma maior capacidade

de adaptabilidade do ambiente, adequando o manejo de adubação e irrigação, e consequentemente tendo uma maior estabilidade no componente de rendimentos.

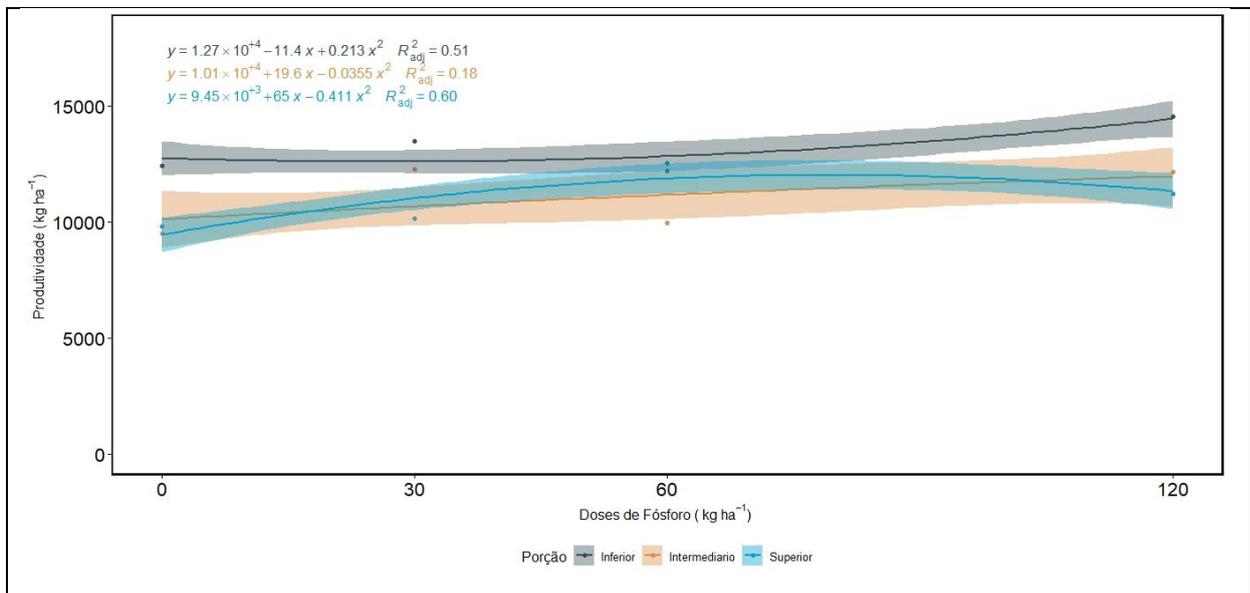


Figura 24 - Produtividade de grãos de arroz irrigado por sulco sob doses de fósforo em híbrido de arroz XP 117 em rotação com soja. Estação Experimental RiceTec, Capão do Leão-RS. Bandas indicam o intervalo de confiança a nível de 95% de confiança. Sulcos com 150 m de comprimento e declividade de 0,1 %. Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente).

## 6.2.2 Componentes de rendimento

### 6.2.2.1 Altura de plantas

Não houve efeito significativo na altura de plantas (Figura 25), quando comparado às doses de fósforo na parte superior do sulco. Ao contrário dos demais nutrientes, o P assume a particularidade de aplicar uma quantidade várias vezes maior do que aquela exigida pelas plantas, pois se torna necessário satisfazer a exigência do solo, saturando os componentes responsáveis pela fixação do P (FURTINI NETO et al., 2001).

Quando um solo é alagado ocorrem grandes alterações químicas e biológicas em relação à condição oxidada. Ocorre a redução de óxidos de ferro que aumentam sua solubilidade e, por estarem diretamente ligados a dinâmica do fósforo, promovem sua desorção e aumento do teor de fósforo na solução do solo (PONNAMPERUMA, 1972). A drenagem do solo após o cultivo de arroz promove a reoxidação das formas reduzidas, com a formação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade (VAHL, 1991), que poderão ser os componentes mais importantes na adsorção de P durante o período em que o solo permanece drenado.

Na altura de plantas de arroz não se observou efeito da dose e porção do sulco, possivelmente em razão do teor de fósforo do solo ser  $7,0 \text{ mg dm}^{-3}$  que é considerado alto para sistema de cultivo de arroz sob alagamento (SOSBAI, 2018).

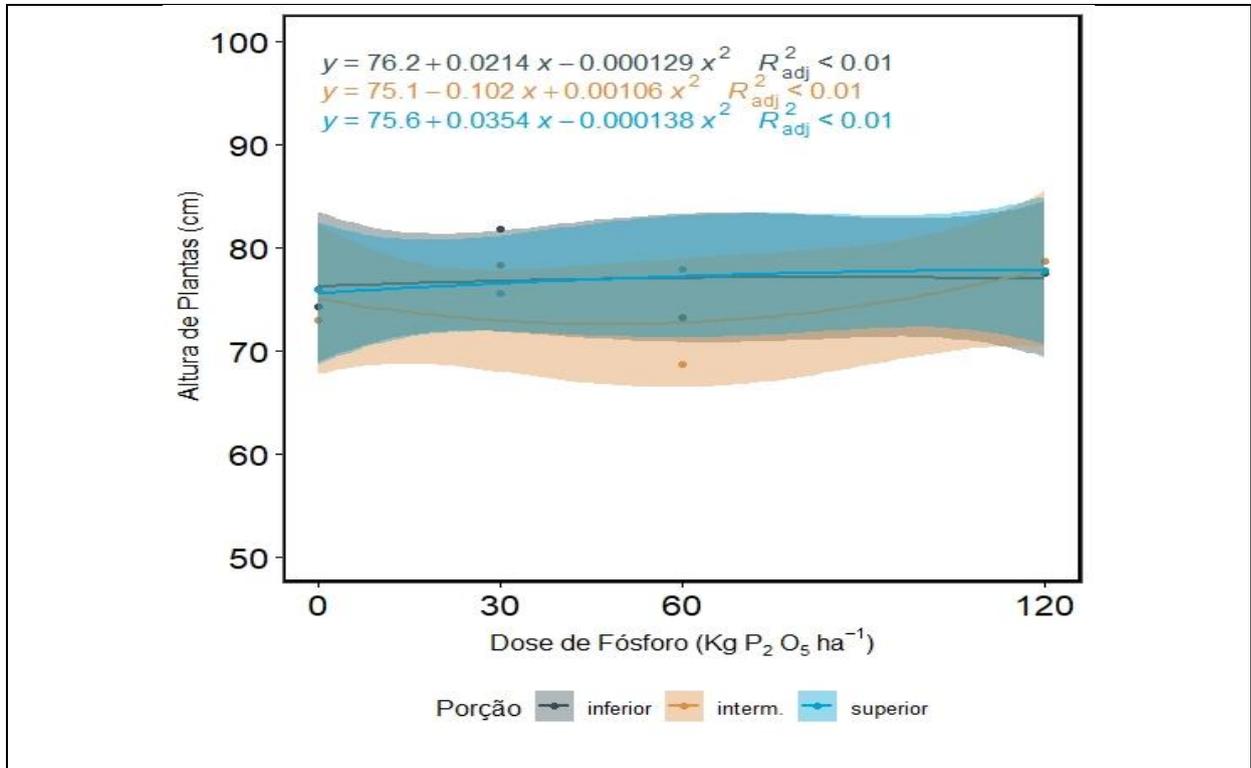


Figura 25 - Estatura de arroz irrigado em sistema sulco-camalhão, em rotação com soja, sob diferentes doses de Fosforo. Híbrido XP 117. Safrá 2020/21. Ricetec, Capão do Leão/RS.

#### 6.2.2.2 Grãos por panícula

O efeito da dose de fósforo e posição da lavoura sobre a variável número de grãos por panícula foi discreto, não havendo resultado estatístico. Nas porções em que o solo está com baixa aeração (porção intermediária), ou úmido (porção superior), o número de grãos por panícula foi menor, possivelmente em razão da menor disponibilidade de fósforo no solo (Figura 26). Segundo Guilherme et al. (2000), existe alternância nas condições de oxirredução do solo, a qual determina modificações intensas na fase sólida mineral do solo e na dinâmica de elementos altamente reativos, como o P.

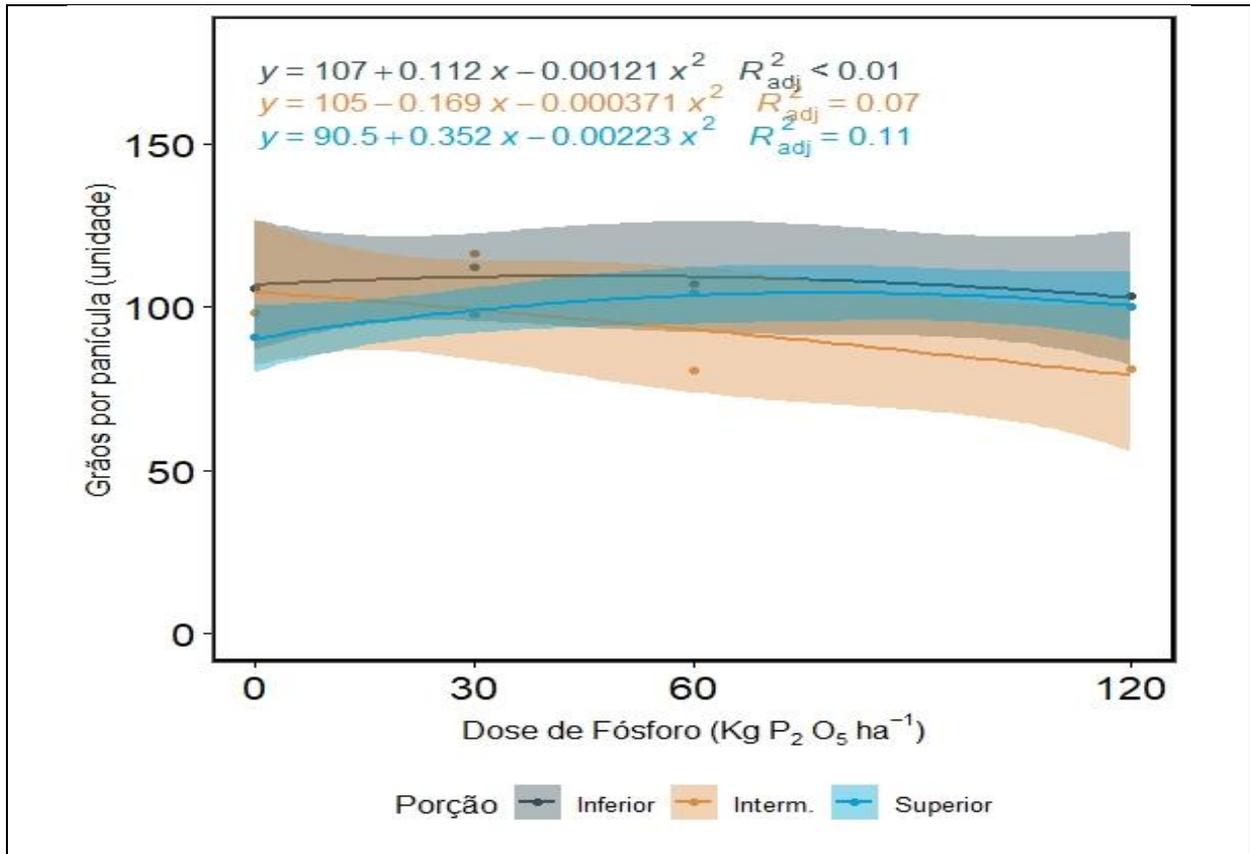


Figura 26 - Número de grãos por panícula (unidade) de arroz em função das doses de fósforo, na safra 2020/2021, na Estação Experimental RiceTec, Capão do Leão-RS. Bandas indicam o intervalo de confiança a nível de 95% de confiança.

### 6.2.2.3 Esterilidade de espiguetas

Observou-se que na dose de 120 kg de  $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , na porção superior da lavoura (Figura 27), foi a que apresentou maior percentual de esterilidade, possivelmente por ser onde a região com menor conteúdo de umidade no solo. Esse resultado corrobora aqueles encontrados por Mezzomo et al. (2009) para a cultivar IRGA 422CL, onde a intermitência da irrigação proporcionou maior esterilidade de espiguetas, relativamente à inundação contínua. Nas demais porções da lavoura, a esterilidade de espiguetas foi bem menor, sendo inclusive significativamente menor quando se utilizou a dose máxima de fósforo. Villa et al. (2006) e Santos et al. (2007) encontraram valores de esterilidade de espiguetas de 17 e 18 %, respectivamente, para mesma cultivar em condições semelhantes de manejo. Os resultados encontrados no presente estudo evidenciaram que o fósforo, quando comparado ao nitrogênio, tem maior influência sobre a variável esterilidade de espiguetas

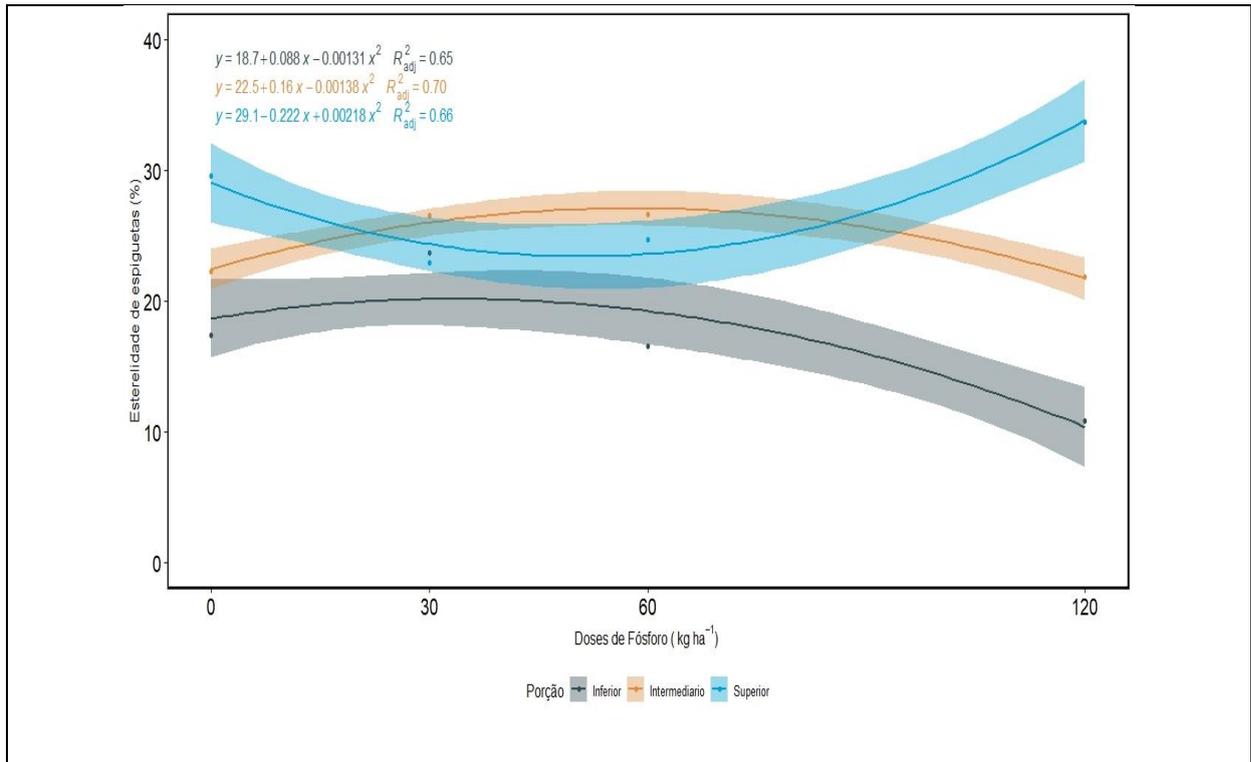


Figura 27 - Análise de regressão entre das doses de Fósforo ( $\text{kg há}^{-1}$ ) e a esterilidade de espiguetas (%) de arroz nas porções Inferior (integralmente alagado), intermediária (integralmente alagado com baixa frequência de aeração do solo) e superior (irrigação intermitente), utilizando o híbrido XP 117, na safra 2020/2021. Centro Tecnológico da RiceTec, Capão do Leão, RS.

#### 6.2.2.4 Peso de 1000 grãos

De forma geral, não houve efeito significativo da dose de fósforo sobre a variável peso de 1000 grãos (Figura 28), exceto para a porção intermediária da lavoura, onde a maior dose de fósforo reduziu o peso de grãos.

Segundo Sarvestani et al. (2008), o estresse hídrico em diferentes fases de desenvolvimento da cultura pode diminuir a translocação de assimilados para os grãos, reduzindo sua massa e aumentando a esterilidade de espiguetas.

#### 6.2.2.5 Panículas/m<sup>2</sup>

Os fatores dose de fósforo e a porção da lavoura (Figura 29) não influenciaram a quantidade de panículas, possivelmente, em razão do alto teor de fósforo no solo.

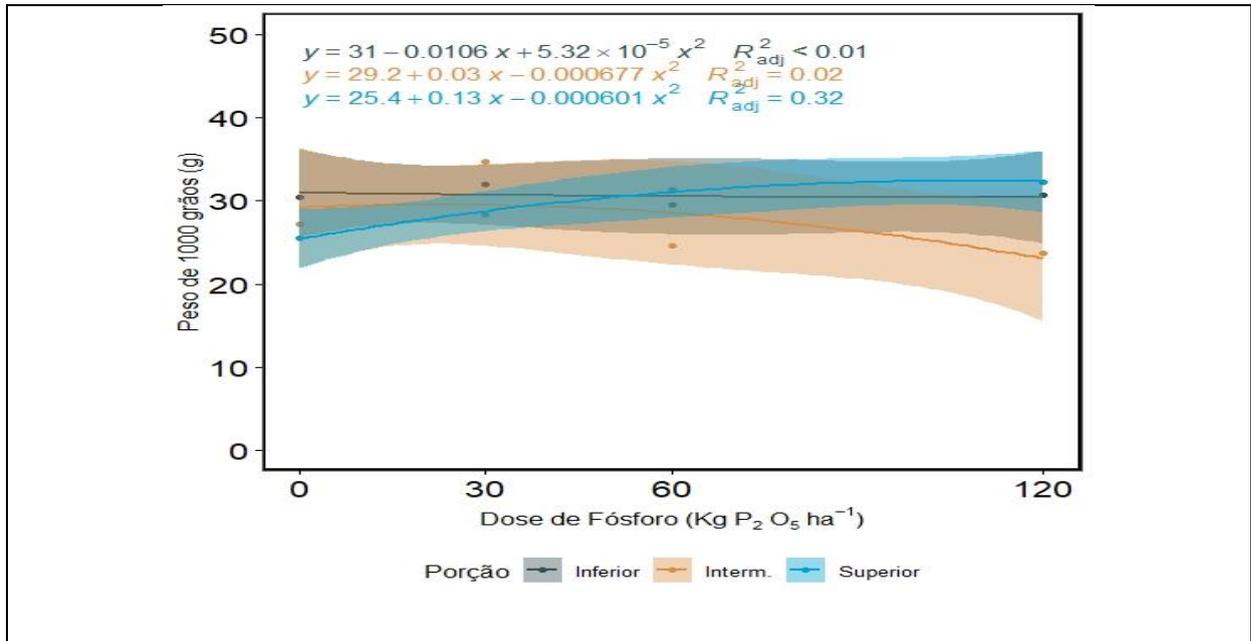


Figura 28 - Análise de regressão linear e intervalo de confiança ( $\alpha=0,05$ ) entre as doses de fósforo e o peso de 1000 grãos (g) de arroz nas porções do sulco, superior, intermediária e inferior, na safra 2020/2021. Capão do Leão, RS.

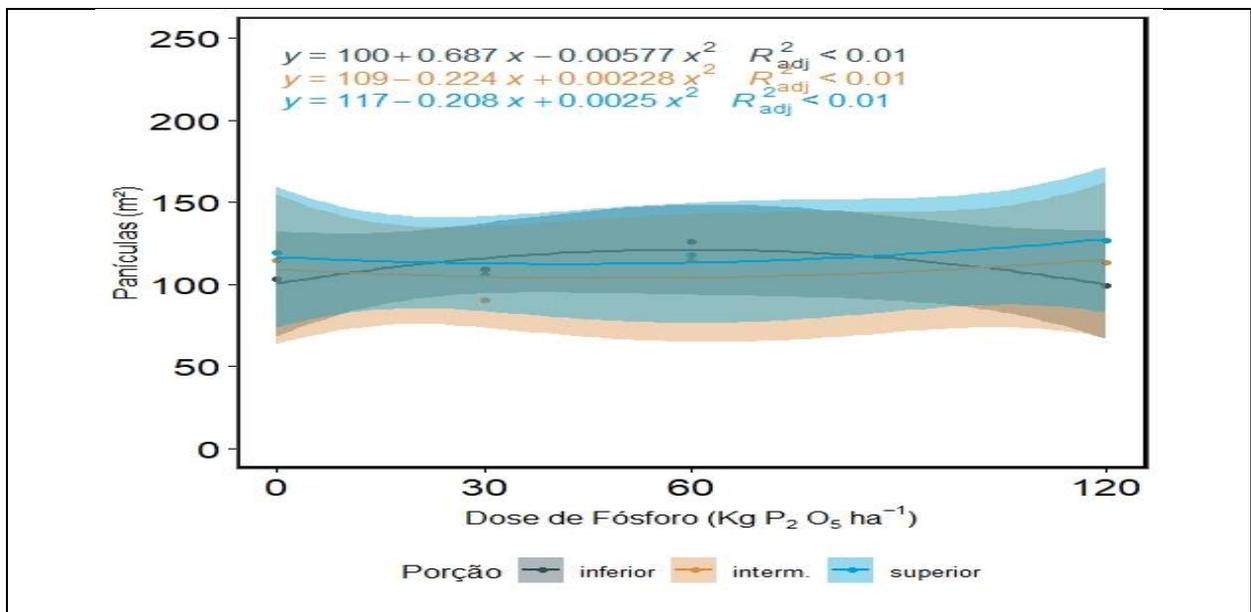


Figura 29 - Panículas por metro quadrado de arroz irrigado no sistema sulco camalhão sob diferentes doses de fósforo (Híbrido XP 117. Safra 2020/2021. CT Ricetec. Capão do Leão – RS

## 7 Conclusões

O arroz irrigado por sulco tem mais potencial produtivo à adubação nitrogenada na porção inferior da lavoura, em razão da manutenção da condição de solo inundado e, portanto do maior potencial de produtividade da lavoura.

O arroz em cultivo irrigado por sulco mostra-se pouco responsivo à adubação fosfatada, pois não foi possível avaliar o efeito da posição do terreno em função da alta disponibilidade de P no solo

No cultivo de arroz irrigado por sulco, o número de panículas por área aumenta e a esterilidade de espiguetas reduz com o aumento das doses de nitrogênio e fósforo. Os demais componentes de produtividade praticamente não são influenciados pelo manejo das adubações nitrogenada e fosfatada para o arroz em cultivo irrigado por sulco.

As perdas de nitrogênio por volatilização de amônia em cultivo de arroz irrigado por sulco são baixas, não variando entre as porções superior, intermediária e inferior da lavoura.

A emissão total de  $N_2O$  do arroz é maior na porção superior da lavoura de arroz irrigado por sulco, em razão da alternância nas condições de oxirredução do solo e dos processos de nitrificação/desnitrificação. Por outro lado, a emissão total de  $CH_4$  é maior na porção inferior da lavoura, onde o solo é mantido inundado.

Pela redução nas emissões de GEE, o cultivo de arroz irrigado por sulco constitui-se em alternativa promissora para mitigação do potencial de aquecimento global parcial da lavoura de arroz no sul do Brasil.

## Referências Bibliográficas

- AULAKH, M. S.; BODENBENDER, J.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H. Methane Transport Capacity of Rice Plants. I. Influence of Methane Concentration and Growth Stage Analyzed with an Automated Measuring System. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** **2000** **58:1**, v. 58, n. 1, p. 357–366, 2000.
- BARBERENA, D. da S.; DE MEDEIROS, R. D.; BARBOSA, G. F. Desenvolvimento e produtividade de arroz irrigado em resposta a diferentes doses de fósforo e potássio, em várzea de primeiro ano, no estado de Roraima. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p. 462–470, 2011.
- BARONI, G.; BENEDETI, P.; SEIDEL, D. Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. **Revista Thema**, v. 14, n. 4, p. 55–64, 6 dez. 2017.
- BOENI, M.; ANGHINONI, I.; JUNIOR, S. A. G.; FILHO, B. D. O. Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul - PDF Free Download. **Instituto Rio Grandense do Arroz - Boletim técnico**, **10**, p. 40, 2010.
- BYERNES, B. H. Liquid fertilizers and nitrogen solutions. (I. F. D. Center, Ed.) In: Fertilizer manual., Alabama. **Anais...** Alabama: 2000.
- CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K.; MINAMI, K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. **Plant and Soil** **1997** **196:1**, v. 196, n. 1, p. 7–14, 1997.
- CAMPELO JÚNIOR, J.H. Avaliação da capacidade de extração da água do solo pelo arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.) sob diferentes doses de nitrogênio. 1985. 127p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: **Fertilidade do Solo**. 1. Ed. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 236–379.
- CANTARELLA, H.; MATTOS, D.; QUAGGIO, J. A.; RIGOLIN, A. T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** **2003** **67:3**, v. 67, n. 3, p. 215–223, nov. 2003.
- CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J. L.; BERNOUX, M. Soils, a sink for N<sub>2</sub>O? A review. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 1–17, 1 jan. 2007. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2486.2006.01280.x>>.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos (safra 2018/2019). 4º Levantamento: janeiro/2019. Disponível em:< <http://www.conab.gov.br> >
- COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Metropole, p. 545-559. 2008.
- EMBRAPA CLIMA TEMPERADO. Arroz irrigado: recomendações técnicas da

pesquisa para o Sul do Brasil. Pelotas : Embrapa Clima Temperado/IRGA/EPAGRI, 1999. 124p. (Embrapa Clima Temperado. Documento, 57).

FAO, Food and Agriculture Organization. *Arroz Híbrido para Contribuir a la Seguridad Alimentaria*. v.1, n.1 p. 2, 2004.

FREITAS, J. G.; CANTARELLA, H.; SALOMON, M. V.; MALAVOLTA, V. M. A.; DE CASTRO, L. H. S. M.; GALLO, P. B.; AZZINI, L. E. Produtividade de cultivares de arroz irrigado resultante da aplicação de doses de nitrogênio. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 317–325, 2007.

FAGERIA, N. K.; CARVALHO, M. C. S. Comparison of Conventional and Polymer Coated Urea as Nitrogen Sources for Lowland Rice Production. **Journal of Plant Nutrition**, v. 37, n. 8, p. 1358–1371, 2014.

FAGERIA, N.; SLATON, N.; AGRONOMY, V. B.-A. in; 2003, undefined. Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. **Advances in Agronomy**, v. 80, p. 63–152, 2003.

FIDELIS, R. R.; MIRANDA, G. V.; FALUBRA, J. S. Capacidade de combinação de populações de milho tropicais sob estresse de baixo nitrogênio. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 3, p. 358–366, 2016.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J.L. Manual da cultura do arroz. Jaboticabal: Funep, 1993. 221p

GOMES, J.; BAYER, C.; DE SOUZA COSTA, F.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 1, p. 36–44, 1 dez. 2009.

GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; RENÓ, N. B.; MACHADO, R. A. F. ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE VÁRZEA DO ESTADO DE MINAS GERAIS (1). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 24, p. 27–34, 2000.

GRIEBELER, G. et al. Influência da irrigação de lavoura arroseira sobre a dinâmica de nutrientes do solo. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do solo e Nutrição de Plantas, 29. ; 2010, Guarapari: **Anais...Guarapari**: SBCS, 2010.

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

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

HOU, A. X.; CHEN, G. X.; WANG, Z. P.; CLEEMPUT, O. Van; PATRICK, W. H. Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice Field in Relation to Soil Redox and Microbiological Processes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 2180–2186, 1 nov. 2000.

IPNI - International Plant Nutrition Institute - IPNI. Nitrification Inhibitors. Nutrient Source Specific. IPNI, n. 26, 2014.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. Área e produção de arroz. 2021. Disponível em: <<https://www.irga.rs.gov.br/safras-2>>

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Adoption and acceptance of the “2013 supplement to the 2006 guidelines: wetlands”. Georgia. Accepted Report. Thirty-seventh session of the IPCC. Georgia, 14 - 18 October, 2013.

IIDA, T.; DEB, S. K.; KHARBUJA, R. G. Nitrous oxide emission measurement with acetylene inhibition method in paddy fields under flood conditions. **Paddy and Water Environment**, v. 5, n. 2, p. 83–91, 24 mar. 2007.

KEMPE, K.; GILS, M. Pollination control technologies for hybrid breeding. **Molecular Breeding** 2011 27:4, v. 27, n. 4, p. 417–437, 2011.

LINQUIST, B.; VAN GROENIGEN, K. J.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C.; VAN KESSEL, C. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. **Global Change Biology**, v. 18, n. 1, p. 194–209, 2012.

LIU, S.; QIN, Y.; ZOU, J.; LIU, Q. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N<sub>2</sub>O emission in a paddy rice–winter wheat rotation system in southeast China. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 4, p. 906–913, 2010.

MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; SILVEIRA, P. M.; CARVALHO, M. C. S.; SILVA, M. A. S.; BERNARDES, T. G.; COSTA, A. R.; MACHADO, P. L. O. A. perdas de nitrogênio via emissão de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e volatilização de amônia (NH<sub>3</sub>) no feijoeiro irrigado. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 2011, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2011.

MALYAN, S. K.; BHATIA, A.; KUMAR, A.; GUPTA, D. K.; SINGH, R.; KUMAR, S. S.; TOMER, R.; KUMAR, O.; JAIN, N. Methane production, oxidation and mitigation: A mechanistic understanding and comprehensive evaluation of influencing factors. **Science of The Total Environment**, v. 572, p. 874–896, 2016.

MANIKANDAN, A.; SUBRAMANIAN, K. Evaluation of Zeolite Based Nitrogen Nano-fertilizers on Maize Growth, Yield and Quality on Inceptisols and Alfisols. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 9, n. 4, p. 1–9, 2016.

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.

MAUAD, M.; CARLOS, ; CRUSCIOL, A. C.; HÉLIO, ; FILHO, G.; CORRÊA, J. C. N and Si fertilization of upland rice NITROGEN AND SILICON FERTILIZATION OF UPLAND RICE. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 761–765, 2003.

MIKKELSEN, D. S. Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. **Plant and Soil**, v. 100, n. 1, p. 71–97, 1987.

MOSIER, A. R. Chamber and isotope techniques. In. ANDREAE, M. O.; SCHIMMEL, D. S. (Eds.). Exchange of traces gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop. Berlin: Wiley. p. 175-187. 1989.

NÔMMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. **Plant and Soil**, v. 39, n. 2, p. 309–318, out. 1973.

NORMAN, R.J.; WILSON JR., C.E.; SLATON, N.A.; BOOTHE, D.L.; GRIGGS, B.R. Influence of nitrogen fertilizer source, application rate and timing on grain yields of

delayed, flood rice. Atlanta: Potash and Phosphate Institute, 2002. 5 p.

O'MARA, F. P. The role of grasslands in food security and climate change. **Annals of botany**, v. 110, n. 6, p. 1263–1270, 2012.

PONNAMPERUMA, F. N. The Chemistry of Submerged Soils. **Advances in Agronomy**, v. 24, p. 29–96, 1972.

REDDY, K. R.; DELAUNE, R. D. **Biogeochemistry of Wetlands : Science and Applications**. 1st Edition ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

SAHA, B.; PANDA, P.; PATRA, P. S.; PANDA, R.; KUNDU, A.; ROY, A. K. S.; MAHATO, N. Effect of Different levels of Nitrogen on Growth and Yield of Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars under Terai-agro Climatic Situation. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 7, p. 2408–2418, 2017.

SAVANT, N.; JAMES, A.; MCCLELLAN, G. Effect of amounts and sequence of additions of urea and water on hydrolysis of surface-applied granular urea in unsaturated soils. **Fertilizer Research**, v. 11, n. 3, p. 231–243, 1987.

SNYDER, C. S.; SLATON, N. A. Rice Production in the United States-An Overview. **Better Crops International**, v. 16, p. 30–35, 2002.

SIGNOR, D. Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases do efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba. 2010. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Solos) - Universidade de São Paulo, USP, Piracicaba, SP, 2010.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA. Emissões Totais. 2019. Disponível em: Acesso em 14 abr. 2019

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Porto Alegre, RS: SOSBAI, 2018, 205 p.

SOUZA, R.O.; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L.C. Solos alagados (reações redox). In : MEUER, E.J. (Ed). Fundamentos de química do solo. 4.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 171-195

SOUZA, R.O.; VAHL, L.C.; OTERO, X.L. QUÍMICA DE SOLOS ALAGADOS. IN: MELO, V.F.; ALLEONI, L.F. (ORG). Química e Mineralogia do solo. Parte II- Aplicações- Viçosa: Sociedade Brasileira de ciência do solo, 2009. V.2, p.458-528

SOUZA, S. R.; FERNANDES, M. S. Nitrogênio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 215-252.

SCHERNER, A.; SCHREIBER, F.; ANDRES, A.; CONCENÇO, G.; MARTINS, M.B.; PITOL, A. Rice crop rotation: a solution for weed management, In: Rice crop t current developments, Farooq Shah, IntechOpen, 2018.

SCHOENFELD, R. Sistemas de rotação arroz e soja em sucessão a plantas de cobertura em Planossolo Haplíco. 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

SCIVITTARO, W. B.; MACHADO, M. O. Adubação e calagem para a cultura do arroz

- irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. (ed.). Arroz Irrigado no Sul do Brasil. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.259- 303
- SCIVITTARO, W. B.; GOMES, A. S. Manejo da água e do nitrogênio em arroz irrigado. EMBRAPA, Comunicado técnico 149, 1ª ed, 2006, 8 p.
- STRECK, Edeimar Valdir et al.; FLORES, Carlos Alberto; SCHNEIDER, Paulo (Clbs.) **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed., Rev. e Ampl. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2018. 252 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.
- TEDESCO, M. J., GIANELLO, G., BISSANI, C. A. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2 ed. rev. e ampliada. Porto Alegre-RS: Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 1995, 174p.
- TOWPRAYOON, S.; SMAKGAHN, K.; POONKAEW, S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. **Chemosphere**, v. 59, n. 11, p. 1547–1556, 2005.
- TYAGI, L.; KUMARI, B.; SINGH, S. N. Water management — A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 5, p. 1085–1090, 2010.
- TRACY et al. Guidelines for Producing Rice Using Furrow Irrigation. Missouri :Extension University Missouri, p.7, 1993
- VAHL, L.C. Utilização racional dos fertilizantes e da água na cultura do arroz irrigado em solos no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Adubos Trevo, s.d. 17 p. (Culturas Brasileiras). 1991
- VOLK, M.G. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf of bare soils. **Agronomy Journal**., v.51, p.746-749, 1959.
- VLEK, P. L.; CRASWELL, E. T. Ammonia volatilization from flooded soils. **Fertilizer Research**, v. 2, n. 4, p. 227–245, 1981.
- VORIES, E. D.; STEVENS, W. E.; TACKER, P. L.; GRIFFIN, T. W.; COUNCE, P. A. Rice Production with Center Pivot Irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 29, n. 1, p. 51–60, 2013.
- ZSCHORNACK, T. Emissões de metano e de óxido nitroso em sistemas de produção de arroz irrigado no sul do Brasil e potencial de mitigação por práticas de manejo. 2011. 87 f. Tese (Doutor em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- WESZ, J.; SOUSA, R. O.; SCIVITTARO, W. B.; PILLON, C. N.; BAYER, C.; WOLTER, R. C. D. Influência do manejo da irrigação nos fluxos de metano e óxido nitroso no cultivo de arroz irrigado. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 7, **Anais...**, v. 2, p. 532-535, Camboriú-SC, 2011.
- WILSON, C. E.; BOLLICH, P. K.; NORMAN, R. J. Nitrogen Application Timing Effects on Nitrogen Efficiency of Dry-Seeded Rice. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 4, p. 959–964, 1998.

