

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**EFLUXO DE METANO EM SOLO SOB MANEJOS DE  
IRRIGAÇÃO E CULTIVARES DE ARROZ IRRIGADO**

**TESE DE DOUTORADO**

**Diovane Freire Moterle**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

# **EFLUXO DE METANO EM SOLO SOB MANEJOS DE IRRIGAÇÃO E CULTIVARES DE ARROZ IRRIGADO**

**Diovane Freire Moterle**

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

**Orientador: Prof. Leandro Souza da Silva**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2011**

**M887e Moterle, Diovane Freire**

Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado / Diovane Freire Moterle. – 2011.

146 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

Orientação: Prof. Dr. Leandro Souza da Silva.

1. Agricultura. 2. Arroz. 3. Arroz irrigado. 4. Manejo do arroz. 5. Irrigação. 6. Morfologia do arroz. 7. Efeito estufa. I. Silva, Leandro Souza, orientador. II. Título.

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

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

**EFLUXO DE METANO EM SOLO SOB MANEJOS DE IRRIGAÇÃO E  
CULTIVARES DE ARROZ IRRIGADO**

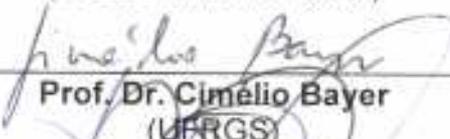
elaborada por  
**Diovane Freire Moterle**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



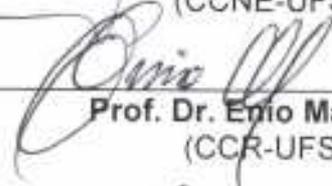
**Prof. Dr. Leandro Souza da Silva**  
(Presidente/Orientador)



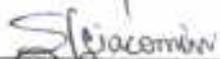
**Prof. Dr. Cimélio Bayer**  
(UFRGS)



**Prof. Dr. João Marcelo Santos de Oliveira**  
(CCNE-UFSM)



**Prof. Dr. Epio Marchesan**  
(CCR-UFSM)



**Prof. Dr. Sandro Giacomini**  
(CCR-UFSM)

Santa Maria, 19 de dezembro de 2011

## DEDICATÓRIA

A minha esposa

Viviane Campanhola Bortoluzzi

Aos meus Pais

Paulo Moterle  
Maria José Freire Moterle

Aos meus irmãos

Alessandro Freire Moterle  
Paulo Henrique Moterle

Aos meus sogros

Maria Campanhola Bortoluzzi  
Divo José Bianchin Bortoluzzi

*A todos o meu muito obrigado!*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria pelo acesso ao conhecimento e às oportunidades.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelo excelente curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento à pesquisa.

Ao professor Leandro Souza da Silva pela orientação, amizade e conhecimentos adquiridos durante estes anos.

Aos professores Danilo Rheinheimer dos Santos e João Kaminski pelos ensinamentos e amizade.

Ao professor Sandro Giacomini pelo auxílio na realização do trabalho.

Aos professores Luis Ávila e Enio Marchesan e às equipes de pesquisa, pela disponibilidade do experimento de campo para as avaliações.

Ao Eng. Agr. Rafael Mezzomo pelo auxílio prestado.

Ao professor Cimélio Bayer e à equipe de pesquisa pelas análises de gases no primeiro experimento.

Ao professor João Marcelo Santos de Oliveira pelos ensinamentos, disponibilidade de material e auxílio nas análises morfológicas do arroz.

Aos demais professores do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo que contribuíram na minha formação profissional.

Ao funcionário do PPGCS Everton pelo auxílio e prestatividade.

Aos funcionários do Departamento de Solos Alex e Finamor pelo auxílio e amizade.

Aos bolsistas, Marco Antônio Lenz Scottto, Gerson Drescher, Renato Luis Fagundes e Eduardo Augusto Miller pelo auxílio na execução do trabalho.

Aos colegas Gustavo Griebeler e Vagner João Moro pela amizade e o auxílio prestado durante o curso.

Ao IRGA, EMBRAPA, EPAGRI, RICETEC e BAYER pela cedência de sementes de cultivares de arroz irrigado.

Ao amigo e colega Carlos Alberto Casali pelas “empreitadas”.

Aos colegas do setor de Química e Fertilidade do Solo da UFSM, Copetti, Fábio, Tales, Pelegrini, Jimmy, enfim a toda a “xiruzada”.

Aos demais colegas do PPGCS pelas discussões e amizade durante o curso.

Aos colegas do Instituto Federal do Paraná Campus Palmas pela amizade e compreensão.

Aos professores e alunos do Instituto Federal do Rio Grande do Sul Campus Bento Gonçalves pelo auxílio prestado nos momentos finais.

Ao meu cunhado Edson Bortoluzzi pela amizade e auxílio nas atividades de pesquisa.

Aos colegas da “sala 9” do Instituto Federal do Rio Grande do Sul Campus Bento Gonçalves pelo convívio e amizade.

A pessoa que mais me auxiliou na chegada até aqui, minha esposa Viviane, te amo e obrigado por tudo.

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### EFLUXO DE METANO EM SOLO SOB MANEJOS DE IRRIGAÇÃO E CULTIVARES DE ARROZ IRRIGADO

AUTOR: DIOVANE FREIRE MOTERLE  
ORIENTADOR: LEANDRO SOUZA DA SILVA  
Santa Maria, 19 de dezembro de 2011.

A atividade antrópica tem sido apontada como a principal causa do aquecimento global pelo efluxo de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ . Nos últimos anos, os efeitos prejudiciais do aumento da concentração atmosférica desses gases têm despertado os cientistas a propor mecanismos de mitigação. A cultura do arroz irrigado por alagamento é responsável por cerca de 12% do efluxo total de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera, sendo considerada uma das principais fontes emissoras desse gás de efeito estufa. Os fatores que controlam o efluxo de  $\text{CH}_4$  no arroz irrigado são muitos, dificultando identificar com precisão os mecanismos responsáveis pelo seu efluxo. O regime de irrigação e a seleção de cultivares de arroz são fatores que afetam o efluxo de  $\text{CH}_4$  e podem ser modificados visando mitigar os efluxos para a atmosfera. Os objetivos da tese foram: (a) verificar o efeito do regime de irrigação contínua, intermitente e a banhos no efluxo de  $\text{CH}_4$  em um Planossolo cultivado com arroz irrigado por alagamento na Depressão Central do Rio Grande do Sul; (b) avaliar o efluxo de  $\text{CH}_4$  no arroz cultivado em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação e relacionar o efluxo com parâmetros agrônômicos da planta de arroz; (c) avaliar os sistemas de manejo de irrigação na cultura do arroz e os efeitos nos atributos eletroquímicos da solução do solo e no desenvolvimento das plantas; (d) avaliar o efluxo de  $\text{CH}_4$  em cultivares de arroz do RS e SC e relacionar com atributos morfofisiológicos das cultivares; e (e) caracterizar morfológicamente a cultura do arroz e verificar a provável rota de difusão do  $\text{CH}_4$  do solo até a atmosfera. A prática da irrigação intermitente foi eficiente em mitigar o efluxo de  $\text{CH}_4$  no cultivo do arroz irrigado quando as condições climáticas permitiram a ausência da lâmina de água durante o cultivo, sem diminuir a produtividade do arroz. O manejo da irrigação intermitente com o realagamento do solo ainda saturado diminuiu a emissão de  $\text{CH}_4$  em 70%. O manejo intermitente da irrigação com o realagamento do solo abaixo da capacidade de campo não causa efluxo de  $\text{CH}_4$ , porém os efeitos foram negativos sobre a produtividade do arroz. O manejo da irrigação afeta as condições eletroquímicas do solo e são determinantes para a produção de  $\text{CH}_4$  nos solos. A dinâmica de efluxo de  $\text{CH}_4$  é semelhante entre as cultivares, porém, existem diferenças no potencial de efluxo de  $\text{CH}_4$  em cultivares de arroz irrigado por alagamento. As cultivares Arize 1003, Avaxi CI, BRS Atalanta, BRS Querência, BRS Taim, Inov CI, Irga 422 e Irga 424 apresentaram menor efluxo de  $\text{CH}_4$  com a maior produtividade do arroz. As características morfofisiológicas das plantas não explicaram completamente as diferenças de efluxos de  $\text{CH}_4$  entre as cultivares.

**Palavras-chave:** efeito estufa, arroz irrigado, manejo do arroz, irrigação intermitente, morfologia do arroz.

## ABSTRACT

Doctor Science Thesis  
Graduate Program in Soil Science  
Federal University of Santa Maria

### **CULTIVARS AND SOIL IRRIGATION MANAGEMENT INTO METHANE EFFLUX OF IRRIGATED RICE FIELDS**

AUTHOR: DIOVANE FREIRE MOTERLE  
ADVISOR: LEANDRO SOUZA DA SILVA  
Santa Maria, Dezember 19<sup>th</sup>, 2011.

Human activity has been pointed out as the main reason of global warming by effluxes of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>. In the last years, harmful effects of greenhouse gases due to its increase in atmosphere have been arousing interests of scientists into propose mechanisms of mitigation. Flooding rice is responsible for about 12% of CH<sub>4</sub> released to atmosphere and therefore, is considerate one of the most important source of this greenhouse gas. There are many factors that control CH<sub>4</sub> efflux in irrigated rice fields, which difficult an accurate identification of the responsible mechanisms. However, is known that irrigation regime and selection of rice cultivars affect CH<sub>4</sub> efflux and may be managed intending to mitigate it. The objectives of this thesis were: (a) verify the effect of continuous irrigation, intermittent irrigation and intermittent flooding into CH<sub>4</sub> efflux of a hapludalf soil cultivated with flooding rice at central region of Rio Grande do Sul State; (b) evaluate CH<sub>4</sub> efflux of rice cultivated in greenhouse under different irrigation managements and relate the efflux to agronomic parameters of rice plants; (c) evaluate the irrigation systems over the rice crop and how it affect the electrochemical of soil solution and plant development; (d) evaluate CH<sub>4</sub> efflux through cultivars of rice from Rio Grande do Sul and Santa Catarina States and relate it to plant morphological attributes. Intermittent irrigation was efficient to mitigate CH<sub>4</sub> efflux in rice cultivations, when the lack of rain did not establish water layers, without having decrease in rice productivity. Intermittent flooding management by irrigations, even at saturated soil, decreased the CH<sub>4</sub> efflux by 70%. The management of intermittent flooding by irrigations when soil was below the field capacity do not cause CH<sub>4</sub> efflux, however, this management caused decrease of rice productivity. Irrigation management does affect electrochemical conditions of soil, which are determinant to the CH<sub>4</sub> production in soils. The dynamic of efflux of CH<sub>4</sub> is similar between cultivars; however, there are differences on potential of CH<sub>4</sub> efflux from cultivars of flooding rice. The cultivars Arize 1003, Avaxi CI, BRS Atalanta, BRS Querência, BRS Taim, Inov CI, Irga 422 and Irga 424 have showed lower efflux and higher productivities. Morphological characteristics of plants have not explained completely the differences of CH<sub>4</sub> effluxes between cultivars.

**Palavras Chave:** greenhouse effect, lowland rice, rice management, irrigation intermittent, morphology of rice.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Valores de pH (a) e (c) e Eh (b) e (d) da solução do solo em função do manejo de irrigação no arroz .....	44
Figura 2 -	Efluxo de CH <sub>4</sub> em diferentes sistemas de irrigação no arroz e a precipitação acumulada em cada coleta nos anos agrícola 2007/2008 (a) e 2009/2010 (b). As barras verticais indicam o desvio padrão. As setas sobre o eixo x indicam as datas em que ocorreram a ausência da lâmina de água sobre o solo .....	48
Figura 3 -	Temperatura média e radiação solar durante o ciclo do arroz cultivado em Santa Maria, a) ano agrícola 2007/2008, temperatura média de 23,2 °C e radiação solar média de 468,7 cal cm <sup>2</sup> dia <sup>-1</sup> ; b) ano agrícola 2009/2010, temperatura média de 24,2 °C e radiação solar média de 463,4 cal cm <sup>2</sup> dia <sup>-1</sup> .....	51
Figura 4 -	Representação da câmara utilizada para a coleta das amostras de ar no sistema solo-água-atmosfera do experimento em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação no arroz ..	59
Figura 5 -	Sistema para determinação de pH e Eh da solução do solo no experimento em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação no arroz .....	59
Figura 6 -	Taxa de efluxo de CH <sub>4</sub> no experimento em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação no arroz .....	64
Figura 7 -	Relação entre o valor de Eh da solução do solo e efluxo de CH <sub>4</sub> no arroz irrigado em casa de vegetação nos diferentes manejos de irrigação .....	67
Figura 8 -	Área foliar do arroz no experimento em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação .....	70
Figura 9 -	Taxas de efluxo de N <sub>2</sub> O no experimento em casa de vegetação em função do manejo de irrigação no arroz .....	72
Figura 10 -	Valores de pH (a) e Eh (b) da solução do solo em função do manejo de irrigação durante o ciclo da cultura do arroz cultivado em casa de vegetação .....	79
Figura 11 -	Teores de Fe <sup>2+</sup> (a) e Mn <sup>2+</sup> (b) da solução do solo em função do manejo de irrigação durante o ciclo da cultura de arroz cultivado em casa de vegetação .....	82

Figura 12 - Teores de $\text{Ca}^{2+}$ (a) e $\text{Mg}^{2+}$ (b) da solução do solo em função do manejo de irrigação do arroz cultivado em casa de vegetação .....	85
Figura 13 - Teores de carbono da solução do solo no cultivo do arroz submetido a diferentes manejos de irrigação .....	85
Figura 14 - Taxas de efluxo de $\text{CH}_4$ em cultivares de arroz irrigado em função do alagamento do solo durante o ciclo da cultura. As cultivares foram divididas em: (a) alto potencial de efluxo de $\text{CH}_4$ ; (b) médio efluxo de $\text{CH}_4$ ; (c) baixo efluxo de $\text{CH}_4$ .....	96
Figura 15 - Figura 15 - Regressão linear simples entre o efluxo de $\text{CH}_4$ no arroz e as variáveis: a) produtividade de grãos; b) matéria seca; c) área foliar; d) estatura; e) número de perfilhos; f) número de folhas por planta .....	105
Figura 16 - Seção transversal da lâmina da folha do arroz e da bainha da folha do arroz .....	111
Figura 17 - Seção transversal da região nodal do arroz .....	113
Figura 18 - Seção transversal do caule na região do entrenó do arroz .....	116
Figura 19 - Corte da seção transversal da raiz do arroz .....	118
Figura 20 - Imagem da raiz e da região nodal do arroz .....	120
Figura 21 - Imagem do caule e da bainha do arroz .....	123
Figura 22 - Rota de transporte de $\text{CH}_4$ da rizosfera do arroz até o ambiente atmosférico .....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores de $E^0_7$ e $E^0$ de alguns sistemas reduzidos que ocorrem em solos alagados .....	22
Tabela 2 -	Equações simplificadas das reações de redução do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), óxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) .....	23
Tabela 3 -	Produtividade do arroz, efluxo total de $\text{CH}_4$ , emissão de $\text{CH}_4$ por quilograma de arroz produzido, estatura de plantas em função dos sistemas de irrigação no arroz nos anos agrícolas 2007/2008 e 2009/2010 .....	52
Tabela 4 -	Esquema ilustrativo dos tratamentos de irrigação adotados na cultura do arroz no experimento em casa de vegetação .....	58
Tabela 5 -	Efluxo acumulado de $\text{CH}_4$ , massa de grãos e taxa média de transpiração do arroz cultivado em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação .....	69
Tabela 6 -	Taxas de transpiração das plantas de arroz nos dias de coleta de $\text{CH}_4$ e correlação com as taxas de emissão de $\text{CH}_4$ no experimento na casa de vegetação .....	71
Tabela 7 -	Características agronômicas do arroz cultivado em casa de vegetação e submetido a diferentes manejos de irrigação .....	86
Tabela 8 -	Concentração e quantidade acumulada de nutrientes na matéria seca do arroz submetida a diferentes manejos de irrigação .....	87
Tabela 9 -	Descrição das características das cultivares de arroz utilizada no experimento em casa de vegetação para avaliação dos atributos morfológicos .....	93
Tabela 10 -	Efluxo total de $\text{CH}_4$ e a produtividade de grãos e matéria seca de cultivares de arroz cultivado em casa de vegetação .....	100

## LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice 1 - Ilustrações da coleta de CH<sub>4</sub> no arroz irrigado realizado no experimento a campo nos anos 2007/2008 e 2009/2010. a) coletores de CH<sub>4</sub> durante o momento da coleta; b) coleta da solução do solo instalado a 10 cm de profundidade; c) ilustração da coleta de CH<sub>4</sub>; d) leitura dos valores de pH e Eh em sistema “fechado”; e) acondicionamento das amostras em ambiente resfriado até o momento da análise e f) análise dos gases CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> por cromatografia gasosa ..... 144
- Apêndice 2 - Altura da lâmina de água de irrigação do experimento com arroz irrigado no campo em função do manejo de irrigação adotado, a) ano agrícola 2007/2008; b) ano agrícola 2009/2010 ..... 145
- Apêndice 3 - Experimento com o cultivo de arroz em casa de vegetação. a) correção dos atributos químicos do solo; b) instalação dos coletores de solução do solo a 10 cm de profundidade; c) plantio das plântulas ..... 146

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Objetivo geral .....	17
1.2 Objetivos específicos .....	17
1.3 Hipóteses .....	18
1.4 Estratégia de estudo .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1 Reações de oxidação e redução em solos .....	20
2.2 Produção de metano em áreas alagadas .....	25
2.3 Manejo da irrigação do arroz e a produção de metano .....	27
2.4 Características morfofisiológicas das plantas de arroz e a emissão de metano .....	32
<b>3 ESTUDO I: EFLUXO DE METANO NO ARROZ IRRIGADO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS DE IRRIGAÇÃO</b> .....	36
<b>3.1 CAPÍTULO I: Efluxo de metano em arroz irrigado sob irrigação contínua e intermitente em um Planossolo do Rio Grande do Sul</b> .....	36
3.1.1 Introdução .....	36
3.1.2 Material e métodos .....	38
3.1.3 Resultados e discussão .....	43
3.1.4 Conclusões .....	53
<b>3.2 CAPÍTULO II: Sistemas de irrigação na cultura do arroz como prática mitigadora de efluxo de metano</b> .....	54
3.2.1 Introdução .....	54
3.2.2 Material e métodos .....	56
3.2.3 Resultados e discussão .....	61
3.2.4 Conclusões.....	73
<b>3.3 CAPÍTULO III: Manejo da irrigação e a nutrição das plantas de arroz</b> .....	74
3.3.1 Introdução .....	74
3.3.2 Material e métodos .....	75
3.3.3 Resultados e discussão .....	77
3.3.4 Conclusões.....	88
<b>4 ESTUDO II: ATRIBUTOS FISIOLÓGICOS E MORFOLÓGICOS DE CULTIVARES DE ARROZ IRRIGADO POR ALAGAMENTO SOBRE OS EFLUXOS DE METANO</b> .....	89
<b>4.1 CAPÍTULO I: Potencial de efluxo de metano associado a características morfofisiológicas de cultivares de arroz irrigado</b> .....	89
4.1.1 Introdução .....	89
4.1.2 Material e métodos .....	91
4.1.3 Resultados e discussão .....	94
4.1.4 Conclusões .....	104
<b>4.2 CAPÍTULO IV: Caracterização estrutural de cultivares de arroz com ênfase na rota de difusão de gases através da planta</b> .....	105

4.2.1 Introdução .....	105
4.2.2 Material e métodos .....	107
4.2.3 Resultados e discussão .....	109
4.2.4 Conclusões.....	126
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>127</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>130</b>
<b>7 APÊNCIDES .....</b>	<b>144</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno físico-químico no qual os gases presentes na atmosfera absorvem luz infravermelha refletidas pela superfície da Terra, retendo o calor na atmosfera terrestre. Esse fenômeno faz com que a temperatura média da Terra se mantenha em torno de 15°C, viabilizando a vida na sua superfície. Os gases atmosféricos que causam o efeito estufa são compostos por vapor de água (H<sub>2</sub>O), ozônio (O<sub>3</sub>), gás carbônico (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e clorofluorcarbonos (CFC<sub>s</sub>). O efeito estufa do tipo antrópico é causado pelo excesso de gases na atmosfera decorrentes das emissões causadas pela atividade humana, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento e a atividade agropecuária. O aumento da temperatura média da superfície da terra em 1,8°C nos últimos anos é atribuído aos recentes aumentos nas concentrações na atmosfera de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. A polêmica sobre os possíveis efeitos prejudiciais do aquecimento global despertou interesse da comunidade científica a desenvolver mecanismos para mitigar o efluxo de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera (IPCC, 2007).

A atividade agrícola se destaca nos efluxos de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, contribuindo com 12% do total das emissões antrópicas de GEE (SMITH et al., 2007). No Brasil, a criação de bovinos é a atividade agrícola que apresenta o maior efluxo de CH<sub>4</sub> para a atmosfera devido à fermentação entérica, a qual responde por 63% do efluxo total antrópico (MCT, 2009). O cultivo do arroz irrigado é responsável pelo efluxo de 269 Gg de CH<sub>4</sub>, contribuindo com apenas 1,4% do efluxo total antrópico brasileiro (MCT, 2009). Este valor é baixo comparado com a região Asiática, tradicional no cultivo do arroz irrigado, cuja contribuição no efluxo de CH<sub>4</sub> atinge 82% do efluxo total antrópico. No entanto, o cultivo de arroz irrigado por alagamento tem papel de destaque em função de que a produção brasileira está concentrada nos Estados do RS e SC, com uma área anual cultivada de aproximadamente 1,2 milhão de hectares (SOSBAI, 2010).

A população mundial atingiu o número de 7 bilhões de pessoas em 2011, com tendência a crescer, cuja projeção é atingir 9 bilhões de pessoas até o ano de 2045. O arroz é a base da alimentação de cerca de metade da população mundial. Isso indica que a demanda de arroz irá crescer, causando o aumento de áreas

cultivadas com arroz nas próximas décadas, assim como a introdução de tecnologias para aumentar a produtividade. Além disso, ao contrário de outras atividades potencialmente poluidoras, o cultivo do arroz irrigado apresenta potencial em diminuir o efluxo desses gases, por meio de técnicas mitigadoras apresentadas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007).

Os fatores que controlam o efluxo de  $\text{CH}_4$  no arroz irrigado são muitos (LEMER & ROGER, 2001). Isso dificulta identificar com precisão a magnitude de cada fator nos mecanismos responsáveis pelo efluxo  $\text{CH}_4$  e sua real influência nas taxas de efluxo promovidas pelo cultivo de arroz. Alguns desses fatores podem ser utilizados na mitigação do efluxo de  $\text{CH}_4$ ; no entanto, apresentam baixa viabilidade prática de utilização. Um exemplo é a seleção de solos com baixo potencial de efluxo de  $\text{CH}_4$ , ou mesmo a adição de fertilizantes minerais ou orgânicos, pois isto poderá impactar na produtividade do arroz. Acredita-se que dentre os fatores que facilmente podem ser introduzidos na produção de arroz, sem comprometer sua área e produtividade, destacam-se os fatores ligados ao manejo da cultura, como o regime de irrigação e o potencial da planta em diminuir o efluxo de  $\text{CH}_4$ .

O regime de irrigação utilizado no cultivo do arroz no Rio Grande do Sul (RS) é a irrigação por alagamento contínuo (SOSBAI, 2010). Ela caracteriza-se por manter uma lâmina de água sobre a superfície do solo durante a maior parte do ciclo de cultivo, o que torna o ambiente anóxico. Uma das implicações do alagamento do solo é que este afeta processos no sistema solo-planta-bactérias, permitindo assim a produção e efluxo de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera. A irrigação por alagamento com lâmina de água intermitente é um manejo de irrigação alternativo à irrigação contínua. Neste manejo de irrigação, o solo é alagado como na irrigação contínua, porém, não é realizada a manutenção da lâmina de água, deixando-a diminuir, permitindo a ausência da lâmina de água, e só depois se inicia um novo ciclo de alagamento. Este processo permite que o solo seja aerado algumas vezes durante o ciclo da cultura, influenciando na atividade das bactérias metanogênicas, permitindo assim diminuir a produção de  $\text{CH}_4$  nos solos sob este sistema.

As cultivares de arroz apresentam características morfofisiológicas distintas, que resultam em diferente capacidade de funcionar como vias de transporte de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera. Estas características estão associadas a liberação de exudatos radiculares que são fonte de substratos para a metanogênese e com as estruturas morfológicas de transporte de  $\text{O}_2$  da atmosfera até as raízes, os aerênquimas. Estes

facilitam a difusão do  $\text{CH}_4$  produzido no solo até atingir a atmosfera. Como o átomo de carbono da molécula de  $\text{CH}_4$  provém em até 90% do carbono assimilado pela fotossíntese do arroz, isso indica que a planta de arroz é um fator importante que controla o efluxo de  $\text{CH}_4$  nesse sistema (AULAKH et al., 2001). A seleção de cultivares de arroz que apresentam baixa capacidade de transporte de  $\text{CH}_4$ , ou a identificação de características fisiológicas que interferem na produção e no efluxo de  $\text{CH}_4$  são estratégias para mitigar as emissões de  $\text{CH}_4$  pela cultura do arroz.

A associação de métodos mitigadores de efluxo de  $\text{CH}_4$ , como a utilização de sistemas de manejo da cultura e a utilização de cultivares que apresentam menor potencial de transporte de  $\text{CH}_4$ , seria uma forma de produzir alimentos com mínima contribuição para o efeito estufa antrópico global.

## 1.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito de diferentes manejos de irrigação na cultura do arroz e verificar os atributos morfofisiológicos das cultivares que se relacionam com o efluxo de CH<sub>4</sub>.

## 1.2 Objetivos Específicos

### 1.2.1 Estudo I

Verificar o efeito do regime de irrigação contínua, intermitente e a banhos no efluxo de CH<sub>4</sub> em um Planossolo cultivado com arroz irrigado por alagamento na Depressão Central do Rio Grande do Sul.

Avaliar o efluxo de CH<sub>4</sub> no arroz cultivado em casa de vegetação submetidos a diferentes manejos de irrigação e relacionar com parâmetros agrônômicos do arroz.

Avaliar os sistemas de manejo de irrigação na cultura do arroz e os efeitos nos atributos eletroquímicos da solução do solo e no desenvolvimento das plantas.

### 1.2.1 Estudo II

Avaliar o efluxo de CH<sub>4</sub> em cultivares de arroz do RS e SC e relacionar com atributos morfofisiológicos.

Descrever a morfologia interna do arroz, a provável rota de difusão de gases na planta e associar com a capacidade de efluxo de CH<sub>4</sub> em diferentes cultivares de arroz.

## 1.3 Hipóteses

### 1.3.1 Estudo I

1. O manejo intermitente da irrigação depende das condições climáticas durante a intermitência para ser eficiente como prática mitigadora no efluxo de CH<sub>4</sub>.
2. O conteúdo de água no solo durante o período de intermitência da irrigação é o fator responsável pela diminuição do efluxo de CH<sub>4</sub> no arroz irrigado.
3. A irrigação intermitente poderá ser considerada uma prática mitigadora do efluxo de CH<sub>4</sub> e a mesma não afeta o desenvolvimento e a produção da cultura.

### 1.3.2 Estudo II

1. As cultivares de arroz utilizadas no RS e SC possuem diferentes potenciais de produção e de efluxo de CH<sub>4</sub> para a atmosfera.
2. As cultivares de arroz afetam a capacidade de transporte de CH<sub>4</sub> em função de diferenças estruturais na sua morfologia.

## 1.4 Estratégia de estudo

A presente tese é dividida em dois estudos. O primeiro estudo tem como objetivo avaliar o efeito de diferentes sistemas de manejos de irrigação sobre os efluxos de  $\text{CH}_4$ . Esse estudo é denominado “*Efluxo de metano no arroz irrigado submetido a diferentes manejos de irrigação*”, que foi composto por dois experimentos, um realizado no campo experimental do departamento de fitotecnia da UFSM e outro em casa de vegetação, no Departamento de Solos da UFSM. Esse estudo foi dividido em três capítulos. O primeiro foi denominado de “*Efluxo de  $\text{CH}_4$  em arroz irrigado sob irrigação contínua e intermitente em um Planossolo do Rio Grande do Sul*”; o segundo de “*Sistemas de irrigação na cultura do arroz como prática mitigadora de efluxo de metano*”; e o terceiro de “*Manejo da irrigação e a nutrição das plantas de arroz*”.

O segundo estudo foi denominado de “*Fatores morfofisiológicos que afetam o efluxo de metano em cultivares de arroz irrigado por alagamento*” e possui o objetivo de avaliar 19 cultivares de arroz quanto ao potencial de efluxo de  $\text{CH}_4$ . Foram determinados atributos fisiológicos e morfológicos das plantas que relacionam com as taxas de efluxo de  $\text{CH}_4$ . O estudo foi dividido em dois capítulos, o primeiro denominado de “*Potencial de efluxo de  $\text{CH}_4$  de cultivares de arroz cultivado no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina*” e o segundo capítulo denominado de “*Caracterização estrutural de cultivares de arroz com ênfase na rota de difusão de gases através da planta*”.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Reações de oxidação e redução em solos

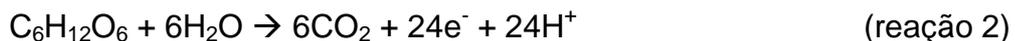
O termo “Redox” é usado para identificar reações de oxidação e redução, ou seja, reações onde ocorre a variação do número de oxidação entre as espécies envolvidas (ESSIGNTON, 2004). O estado em que se encontram as espécies envolvidas nas reações de oxidação e redução nos solos indica a disponibilidade de elétrons no sistema (ATKINS; JONES, 2006). A oxidação de uma espécie envolve a perda de elétrons e a redução, o ganho. Assim, um sistema reduzido possui abundância de elétrons, enquanto que num sistema oxidado existe baixa disponibilidade de elétrons (ATKINS; JONES, 2006). Os agentes oxidantes reduzem, pois retiram elétrons de substâncias redutoras diminuindo o seu número de oxidação. Da mesma forma, as espécies reduzidas se oxidam, tendo seu número de oxidação aumentado.

No cultivo do arroz irrigado, a disponibilidade de água é o fator que afeta o processo de oxidação e redução dos solos. O alagamento do solo durante o manejo da irrigação causa a diminuição do oxigênio livre, devido à baixa taxa de difusão do O<sub>2</sub> na água, tornando um ambiente anaeróbico (Le MER; ROGER, 2001). Uma reação redox é exemplificada na reação 1.

O Fe<sup>+3</sup> é reduzido a Fe<sup>+2</sup> em condições de abundância de elétrons:



No solo cultivado em ambiente aerado, o oxidante mais comum é o O<sub>2</sub>. Neste caso, as bactérias entregam seus elétrons ao O<sub>2</sub>, metabolismo aeróbico, ocorrendo a oxidação do carbono da glicose à CO<sub>2</sub>, conforme a reação 2:



O que governa as reações de oxidação e redução é a tendência de uma reação química em diminuir a sua energia livre, tendendo a atingir o equilíbrio (ATKINS; JONES, 2006). Esta “tendência” pode ser medida em volts. Assim, pode-se expressar a condição “redox” de um sistema utilizando a medida do potencial redox (Eh). O potencial redox é uma medida da tensão entre dois sistemas e pode

ser usada para prever os tipos de espécies reduzidas esperadas na solução do solo (reação 3).



onde:  $n$  número de mols de protons e  $m$  o número de mols de elétrons.

Esta reação pode ser quantificada utilizando o cálculo da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ):

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{(\text{red})}{(\text{Ox})(\text{H}^+)^m} \quad (\text{equação 1})$$

$\Delta G^0$  = variação da energia livre de Gibbs;

R = constante universal dos gases;

T = temperatura absoluta, Kelvin;

Red,  $\text{H}^+$  e Ox = atividade das espécies reduzidas e oxidadas.

Para converter esta reação em volts tem-se:

$$Eh = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(\text{Ox})}{(\text{Red})} + \frac{m}{n} \frac{RT}{F} \ln(\text{H}^+) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

Eh = potencial redox;

$E^0$  = Potencial da semi-reação em condições padrões;

F = Constante de Faraday;

Se a medida do Eh for com um potenciômetro com eletrodo de hidrogênio, a reação fica expressa da seguinte maneira:

$$Eh(mV) = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Red}]}{[\text{Ox}]} \quad (\text{equação 3})$$

Assim, o Eh é uma medida quantitativa da tendência de um determinado sistema de oxidar ou reduzir. Se o Eh for positivo, o sistema é altamente oxidado (maior tendência em adquirir elétrons) enquanto que Eh negativo e fortemente redutor (tendência em descartar elétrons). O Eh assim como pH pode ser medido nos solos indicando a intensidade de redução do solo. Em teoria, a ordem de redução dos compostos nos solos segue a uma ordem decrescente de  $Eh^0$  conforme a Tabela 1.

No cultivo do arroz irrigação pelo método de irrigação por alagamento contínuo, o solo é alagado em até 30 dias após a emergência das plantas, e cessa aproximadamente 10 dias após a floração (SOSBAI, 2010). O tempo em que o solo fica alagado é em função do ciclo da cultivar, que pode variar de 60 dias em variedades de ciclo super precoces até 100 dias em variedades de ciclo tardio. Esse

alagamento do solo para o cultivo do arroz o torna um ambiente anaeróbico (Le MER; ROGER, 2001), pois o oxigênio livre é consumido rapidamente em função da necessidade de energia dos microrganismos aeróbicos, que envolvem a transferência de elétrons ao O<sub>2</sub> (CAMARGO et al., 1999). Na ausência de oxigênio, outros íons eletroceptores podem ser reduzidos a partir da seqüência termodinâmica (Tabela 1). O potencial de elétrons significa a atividade dos elétrons em solução, fator de intensidade, pois é uma medida da energia livre do elétron por mol de elétrons, sendo que  $pe = 0,059 \times Eh$  (mV). Assim, a simples medida do valor de Eh dos solos possibilita identificar as formas com que as espécies se encontram no solo e, conseqüentemente, o grau de redução do solo.

Tabela 1 -  $pe^0$  e  $E^0$  de alguns sistemas reduzidos que ocorrem em solos alagados.

Sistema (25°C)	log K	$E^0$ (v)	$Eh^0_7$ (v)
$O_2 + 4H^+ + 4e \leftrightarrow 2H_2O$	83,32	1,229	0,816
$NO_3^- + 6H^+ + 5e \leftrightarrow 1/2NO_2^- + 3H_2O$	105,15	1,240	0,744
$MnO_2 + 4H^+ + 2e \leftrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	41,66	1,229	0,403
$Fe(OH)_3 + 3H^+ + e \leftrightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$	17,91	1,057	-0,182
$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e \leftrightarrow H_2S + 4H_2O$	41,08	0,303	-0,213
$1/8CO_2 + H^+ + e \leftrightarrow 1/8CH_4 + H_2O$	2,9	0,172	-0,241
$H^+ + e \leftrightarrow 1/2H_2$	0	0	-0,413

Fonte: SOUSA et al. (2009)

Nestas condições, os microrganismos anaeróbicos facultativos e obrigatórios usam espécies inorgânicas como eletroceptores na sua respiração (Tabela 1). Como o sistema pode ser considerado “fechado” (taxa de difusão do O<sub>2</sub> na água é baixa e não supre a demanda microbiológica), ocorre a mudança no potencial de redução dos solos. Outras mudanças também ocorrem no sistema, como a alteração na taxa de decomposição da matéria orgânica, no valor de pH, na disponibilidade de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>3+</sup> e P, entre outros (VAHL; SOUSA, 2004). Assim, após o alagamento, a medida de Eh do solo torna-se o parâmetro físico-químico mais importante na caracterização do grau de redução ou oxidação do solo (ATKINS; JONES, 2006).

O primeiro composto a ser utilizado como aceptor de elétrons após o O<sub>2</sub> é o NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Ele é proveniente da decomposição da matéria orgânica ou da adição de nitrogênio via adubação, nitrificado em zonas aeróbicas do solo (SILVA et al., 2008). A presença de N na forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> em solos alagados produz o N<sub>2</sub>O, que é outro

gás de efeito estufa com potencial de absorção da radiação de 290 vezes ao  $\text{CO}_2$  (WASSMANN et al., 2000). Entretanto, sua produção está restrita ao curso da redução e a disponibilidade de  $\text{NO}_3^-$ . Os próximos compostos a serem reduzidos são os  $\text{MnO}_2$ , seguido  $\text{Fe(OH)}_3$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (Tabela 2). O esgotamento dos compostos inorgânicos como aceptores de elétrons irá desencadear o processo no qual as bactérias anaeróbicas metanogênicas utilizam os compostos orgânicos como aceptores de elétrons (compostos orgânicos com poucos carbonos) transformando em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  (PETERS; CONRAD, 1996). Por este motivo, a disponibilidade dos íons de compostos reduzidos na solução do solo (como o  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$ ) torna-se um bom indicativo do grau de tamponamento do sistema redox. Esse tamponamento é importante, pois indica a velocidade com que o solo torna-se reduzido após o alagamento, influenciando no início do efluxo de  $\text{CH}_4$  (SILVA et al., 2011).

Tabela 2 - Equações simplificadas das reações de redução do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), óxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe(OH)}_3$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Íon	Semi-reação					
$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	+	$6 \text{H}^+$	+	$5\text{e}^-$	$\rightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$
$\text{MnO}_2$	$\text{MnO}_2$	+	$4 \text{H}^+$	+	$2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$
$\text{Fe(OH)}_3$	$\text{Fe(OH)}_3$	+	$3 \text{H}^+$	+	$\text{e}^-$	$\rightarrow \text{Fe}^{2+} + 3 \text{H}_2\text{O}$
$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}$	+	$8 \text{H}^+$	+	$8\text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2\text{S} + 4 \text{H}_2\text{O}$

Fonte: Moreira e Siqueira (2006).

No ambiente alagado, o potencial de redução do solo se torna estratificado verticalmente, de modo que as condições redutoras aumentam com a profundidade (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). A criação desse gradiente é resultado do balanço entre o influxo de  $\text{O}_2$  da atmosfera pela água e o consumo de  $\text{O}_2$  pela microflora do solo. Assim, verifica-se que nos primeiros milímetros na superfície da lâmina de água (2-3 mm) desenvolve-se uma condição aerada, que vai diminuindo a disponibilidade de  $\text{O}_2$  com a profundidade do solo. Desta maneira, as condições para ocorrer a metanogênese aumentam com a profundidade, aumentando a produção de  $\text{CH}_4$  em profundidade (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009).

Uma estratégia para mitigar o efluxo de  $\text{CH}_4$  no arroz irrigado seria a supressão da irrigação ou drenagem do solo durante o ciclo da cultura, permitindo a sua oxidação. A presença de oxigênio elimina a atividade das bactérias metanogênicas, uma vez que estas são anaeróbicas obrigatórias, e,

consequentemente, interrompe a produção de  $\text{CH}_4$  (SASS et al., 1992). Além disso, a entrada de  $\text{O}_2$  no solo irá oxidar os compostos inorgânicos anteriormente reduzidos no solo. Essa oxidação também permite a um grupo específico de bactérias aeróbicas (metanotróficas) oxidar o  $\text{CH}_4$  presente no solo até  $\text{CO}_2$ . Esse efeito irá resultar na diminuição da emissão de  $\text{CH}_4$  pelo arroz irrigado (WASSMANN et al., 2000) e poderá ocorrer mesmo em condições de solo alagado tendo em vista a entrada de oxigênio na rizosfera via aerênquimas do arroz.

Com a supressão da irrigação ou drenagem, o solo novamente é oxidado, sendo que o tempo para que as reações ocorram no sentido contrário a redução variam em função do tipo de solo, o que pode variar desde poucos dias à semanas (Le MER; ROGER, 2001), além da quantidade de íons inorgânicos aceptores de elétrons no solo e do estágio de desenvolvimento da cultura. Outras características influenciam no tempo necessário para oxidar o solo, como altura do lençol freático, precipitação durante o período, sistematização da lavoura, condições climáticas e a evapotranspiração (WANG; NEUE; SAMONTE, 1999). Sass et al. (1992) encontraram que o alagamento aos dois dias após uma drenagem foi suficiente para provocar alteração no grau de redução do solo com diminuição nas quantidades emitidas de  $\text{CH}_4$ . Mishra et al. (1997), com apenas 6 dias após a drenagem, diminuiu o conteúdo de água do solo a capacidade de campo. Hou et al. (2000), em um experimento utilizando um solo com 63% de areia, os valores de Eh passaram de -100 mV durante o alagamento para +200 mV decorridos apenas três dias após a drenagem. Sass et al. (1992) precisou de três semanas após o realagamento do solo para atingir novamente o estado reduzido, anterior a drenagem. Segundo estes autores, drenagens de dois a três dias a cada 21 dias seriam suficientes para diminuir os efeitos prejudiciais da redução do solo, como a diminuição dos efluxos de  $\text{CH}_4$ .

Considerando os impactos negativos da prática da drenagem do solo, especialmente relacionadas com a transferência de sedimentos, nutrientes e agrotóxicos para outros ambientes, a prática mais adequada seria a supressão da irrigação. Desta maneira, a supressão da irrigação do solo até a saturação do solo com água é uma forma de diminuir a disponibilidade de elétrons no solo e com isso aumentar os valores de Eh. O reflexo desse manejo no sistema redox ocorre primeiramente na comunidade bacteriana, diminuindo a sua atividade (PETERS; CONRAD, 1996). Após a eliminação do excesso de água, o oxidante mais forte volta

a ser o  $O_2$ , causando a oxidação de todos os íons inorgânicos, retornando o sistema redox, e conseqüentemente o Eh do solo, aos níveis iniciais antes do alagamento do solo. A seqüência de oxidação dos íons é inversa a da redução (PONNAMPERUMA, 1972).

## 2.2 Produção de $CH_4$ em áreas alagadas

O  $CH_4$  é formado pela decomposição de compostos orgânicos em ambiente anaeróbico (CONRAD, 2002). As bactérias que produzem o  $CH_4$  pertencem aos gêneros *Methanobacterium* e *Methanobrevibacter*, *Methanococcus* e *Methanosarcina*, sendo que os gêneros *Methanobacterium* e *Methanosaecina* são associados a produção de  $CH_4$  na cultura do arroz irrigado (DUBEY, 2005). Essas bactérias são estritamente anaeróbicas e necessitam de um Eh de aproximadamente -200 mV para reduzir o carbono e produzir  $CH_4$  (WANG et al., 1993a e 1993b). No entanto, Peters e Conrad (1996) encontraram efluxo de  $CH_4$  com valores de Eh de + 70 mV, mas os valores de potencial redox determinados nos diferentes experimentos são muito dependentes dos procedimentos utilizados para a sua medição no solo, sendo afetados pelo sistema de coleta da solução do solo e da profundidade considerada. Segundo Peters e Conrad (1996), a atividade redox pode ser considerada um “start” para o início da metanogênese. Essa condição ocorre em solos alagados e na ausência de compostos inorgânicos oxidados, quando os microrganismos passam então a utilizar compostos orgânicos e outros subprodutos das rotas metabólicas como doadores de elétrons no processo de redução (WANG et al., 1993a, CONRAD, 2002).

A decomposição anaeróbica acontece em etapas, envolvendo diversos microrganismos na degradação dos compostos orgânicos. Primeiro, necessitam transformar as moléculas compostas (várias cadeias de carbono) em formas simples (moléculas com poucos carbonos). Inicia-se assim a hidrólise de macromoléculas (lipídios, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos) a monômeros (aminoácidos, açúcares ácidos graxos, glicerol e nucleotídeos) por microrganismos aeróbicos ou anaeróbicos facultativos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). A partir dos monômeros, os microrganismos anaeróbicos facultativos e obrigatórios produzem ácidos orgânicos,

como o acético, propiônico e o butírico por meio da fermentação, utilizados pelas bactérias metanogênicas para produção de  $\text{CH}_4$  (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). O acetato contribui com aproximadamente 80% do carbono para a geração de  $\text{CH}_4$ , enquanto que os compostos  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$  contribuem de 10 a 30% da produção de  $\text{CH}_4$  (DUBEY, 2005).

O início da produção de  $\text{CH}_4$  depende da quantidade de matéria orgânica facilmente biodegradável e da magnitude do sistema redox, após a redução do  $\text{Fe}^{3+}$  e do  $\text{SO}_4^{2-}$ . A disponibilidade de substratos ( $\text{H}_2$  e acetato) no solo é o fator que limita a atividade das bactérias metanogênicas (CONRAD; KLOSE, 1999). As bactérias metanogênicas têm que competir com outras bactérias anaeróbicas pelos substratos disponíveis, tais como as bactérias redutoras de  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (DUBEY, 2005).

Estudos têm relatado diferentes valores de  $\Delta G$  para metanogênese em solos cultivados com arroz irrigado. Valores de  $\Delta G$  de  $-31,6$  a  $34,8 \text{ kJ mol}^{-1}$  de  $\text{CH}_4$  em solos cultivados com arroz na Itália (ACHTNICH; BAK; CONRAD, 1995) e valores entre  $-25$  a  $-50 \text{ kJ mol}^{-1}$   $\text{CH}_4$  para solos cultivados com arroz na Alemanha (PETERS; CONRAD, 1996) têm sido encontrados. Yao e Conrad (1999), considerando que o  $\Delta G$  para bactérias metanogênicas depende de acetato (bactérias acetogênicas), concluíram que, ao contrário da metanogênese  $\text{H}_2$ -dependente, as bactérias acetogênicas não seguem a lei da termodinâmica. Eles descobriram que a produção de  $\text{CH}_4$  foi menor com  $\Delta G$  de  $-26 \text{ kJ mol}^{-1}$   $\text{CH}_4$ . Roy et al. (1997) afirmaram que a produção de  $\text{CH}_4$  é devido principalmente às metanogênicas  $\text{H}_2$ -dependentes e que as metanogênicas acetato-dependente só iniciam quando  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  foram totalmente reduzidos. Diversos dados demonstram que a emissão de  $\text{CH}_4$  nos solos inicia apenas quando os valores de  $\text{Fe}^{2+}$  na solução do solo ultrapassam 90% do máximo atingido (SILVA et al., 2011). Desta maneira a competição pelos substratos entre as bactérias metanogênicas e as bactérias redutoras de sulfato irão influenciar no início da produção e emissão de  $\text{CH}_4$ .

A metanogênese é inibida na presença de  $\text{O}_2$  (CONRAD, 2002), mas ela permanece ativa no solo mesmo com Eh positivo, desde que contenha substrato para a realização da metanogênese (YAO; CONRAD, 1999). A quantidade e duração da metanogênese dependem da relação entre disponibilidade de carbono e quantidade de ferro oxidado ou de outros compostos inorgânicos oxidados (YAO; CONRAD, 1999). Itoh et al. (2011) verificaram que, após o início do efluxo de  $\text{CH}_4$ ,

as taxas se relacionaram com a disponibilidade de substrato às bactérias. Nos solos onde foi retirada a palha do arroz (fonte de carbono às bactérias), após a completa redução do solo, eles não detectaram efluxo no cultivo do arroz. Nestas condições, o pico de efluxo de  $\text{CH}_4$  ocorreu apenas na fase de florescimento da cultura, associada a alta disponibilidade de exudatos radiculares, substrato das bactérias metanogênicas. Assim, a produção de  $\text{CH}_4$  ocorre pela associação de fatores que ocorrem no cultivo do arroz irrigado por alagamento. A existência de uma fonte de substrato disponível para as bactérias metanogênicas (carbono) e a condição ambiental favorável as bactérias (ambiente anaeróbico) propiciam a produção de  $\text{CH}_4$  neste ambiente.

### **2.3 Manejo da irrigação do arroz e a produção de metano**

O controle da disponibilidade de água às plantas em terras “altas” não irrigadas é realizado apenas pela precipitação pluviométrica. Nesse ambiente, o solo se mantém com alta disponibilidade de oxigênio, mantendo o metabolismo aeróbico dos microrganismos do solo, restando como produto final da decomposição de compostos orgânicos, o  $\text{CO}_2$ , água e energia (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). A área de cultivo de arroz nesse ambiente representa 55% da área cultivada no Brasil (CONAB, 2009) e contribui com apenas 28% da produção nacional (CONAB, 2009). Embora a área cultivada seja alta, a produtividade obtida é baixa devido às limitações hídricas e de cultivo no processo produtivo do arroz neste ambiente.

O cultivo do arroz irrigado por alagamento ocorre predominantemente no Sul do Brasil. Esse sistema se caracteriza por um elevado uso de água e baixa eficiência (CORREA et al., 1997). A razão da utilização da irrigação por inundação contínua é em função de alguns benefícios para a cultura neste tipo de manejo, tais como o controle da temperatura proporcionada pela lâmina de água sobre o solo (SOSBAI, 2010), aumento na disponibilidade de nutrientes (PONNAMPERUMA, 1972) e o controle eficiente de plantas daninhas (CORREA et al., 1997). O sistema de irrigação predominante no cultivo do arroz irrigado no RS é a irrigação por alagamento contínuo. A irrigação contínua é conceitualmente definida como aquela em que a cultura permanece com uma lâmina de água sobre a superfície do solo

durante quase todo o ciclo da cultura, que varia em média de 70 a 100 dias. O início da irrigação ocorre entre 15 a 20 dias após a emergência das plântulas e se estende até a maioria dos grãos atingirem o estado pastoso, que deve ocorrer de 10 a 15 dias antes da colheita (SOSBAI, 2010).

A irrigação intermitente é aquela em que se alternam ciclos de alagamento e ausência da lâmina de água sobre o solo. Esse tipo de irrigação é recomendado apenas em locais com abastecimento de água limitado e em áreas sistematizadas (STONE, 2005) ou com problemas de toxidez por ferro (SOUSA et al., 2004). A irrigação intermitente proporciona o uso mais eficiente da água, diminuição das perdas por escoamento superficial, melhor aproveitamento da precipitação e menor perdas por percolação (STONE, 2005). Nos últimos anos tem sido recomendado este sistema de irrigação como prática mitigadora do efluxo de CH<sub>4</sub> (IPCC, 2007; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009; TYAGI; KUMARI; SINGH, 2010). O ponto crítico deste sistema esta na manutenção do conteúdo de água no solo durante o período de intermitência do alagamento. Conteúdo de água no solo inferior a 90% da saturação pode interferir na produtividade da cultura (BOUMAN et al., 2002), o que aumenta a rejeição dos agricultores na sua adoção. Dentre outras causas, a adoção do manejo intermitente da irrigação necessita-se de um completo domínio do sistema, como o nivelamento da área, alta eficiência no controle de plantas invasoras e um dimensionamento adequado do sistema de irrigação, permitindo uma rápida entrada de água nos quadros após o período de intermitência.

A disponibilidade de água é o principal regulador dos processos de redução do solo, com efeito direto na produção, oxidação e transporte de CH<sub>4</sub> (AGOSTINETTO et al., 2002), o alagamento do solo causa a diminuição do oxigênio livre e poucas horas após o alagamento o solo torna-se um ambiente anaeróbico (Le MER; ROGER, 2001). A metanogênese ocorre apenas em condições de baixa disponibilidade de elétrons (Eh abaixo de +70 mV) (PETERS; CONRAD, 1996), isso torna a atividade das bactérias metanogênicas estritamente relacionadas com o conteúdo de água nos solos (Le MER; ROGER, 2001). Chidthaisong et al. (1998) avaliando o valor de Eh para ocorrer o início da produção e emissão de CH<sub>4</sub>, encontraram valores de Eh próximos a -100 mV em solos do Japão. Griebeler et al. (2008), utilizando seis solos do Rio Grande do Sul, Brasil, encontraram valores de Eh entre +290 mV até +130 mV nos primeiros 10 dias após o alagamento, porém a intensidade máxima de redução destes solos foi atingida aos 24 dias de alagamento,

com valores de Eh que variaram de +216 mV até -69 mV. Yu e Patrick (2004), buscando controlar o Eh com o manejo da irrigação, estabeleceram uma janela de Eh em que a emissão de CH<sub>4</sub> e NO<sub>2</sub> é mínima. Os valores de Eh +180 mV e -150 mV apresentaram baixa emissão de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> respectivamente. O controle do Eh utilizando o manejo da irrigação permite criar condições adequadas para o desenvolvimento da cultura e condições inadequadas ao desenvolvimento das bactérias aeróbicas nitrificadoras e anaeróbicas obrigatórias, o que possibilitaria diminuir a emissão de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> respectivamente. Entretanto, variações nos procedimentos de coleta da solução e determinação do Eh podem ser limitantes para estabelecimento de valores adequados e sua utilização em nível de campo.

O manejo da irrigação também pode afetar o potencial produtivo da cultura, seu ciclo, aumentar ou diminuir a toxidez do Fe<sup>+2</sup>, diminuir o estresse em decorrência das altas temperaturas ou ainda atuar no controle das plantas invasoras (SOSBAI, 2007). Santos et al. (1999) encontrou maior produtividade na irrigação contínua comparada com a irrigação intermitente associada as diferenças no perfilhamento e nas épocas de florescimento entre os manejos. Por outro lado, Mezzomo (2009) não encontrou diferenças na produtividade do arroz utilizando os dois tipos de irrigação; no entanto, a irrigação intermitente apresentou a vantagem na economia de água e causou a diminuição de 25% da emissão de CH<sub>4</sub> em uma das safras avaliadas (BRITZKE et al., 2008). No ponto de vista do potencial de emissão de CH<sub>4</sub>, Cai et al. (1997) encontraram menor emissão de CH<sub>4</sub> com apenas uma drenagem de 3 dias durante o ciclo da cultura (18%) e Sass et al. (1992) com apenas uma drenagem de dois dias durante o ciclo da cultura diminuiu em 50% a emissão de CH<sub>4</sub>. Por outro lado, a irrigação intermitente pode aumentar a emissão de N<sub>2</sub>O (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009), pois permite o processo de nitrificação do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> passando a NO<sub>3</sub><sup>-</sup> quando o solo encontra-se oxidado, que ao sofrer o realagamento, é perdido por denitrificação. Itoh et al. (2011) não encontrou aumento no efluxo de N<sub>2</sub>O com a utilização da irrigação por alagamento intermitente, que foi intercalado com apenas uma drenagem no período do perfilhamento da cultura, associada a baixa disponibilidade de N no solo durante este período.

A relação entre a quantidade de água no solo e a emissão de CH<sub>4</sub> tem sido objeto de estudo por diversos autores em diferentes regiões produtoras de arroz no mundo. Na China, Yang e Chang (1998) encontraram que valores inferiores a 23% de água no solo, a emissão de CH<sub>4</sub> é insignificante, enquanto que as taxas máximas

de emissão de  $\text{CH}_4$  ocorreram com umidades superiores a 67% de água no solo. Esses autores estabeleceram a estratégia do controle do potencial redox, utilizando o manejo da água de irrigação. No entanto, esse sistema de controle do potencial redox é difícil de ser realizado em áreas de cultivo a campo, devido às limitações no controle dos fatores que afetam o suprimento de água e oxigênio no sistema.

A irrigação intermitente pode variar quanto ao grau de umidade do solo com que é reiniciada. Essa pode ser reiniciada ainda com o solo saturado, ser reiniciada com o solo na capacidade de campo ou ainda com o conteúdo de água no solo inferior a capacidade de campo. Dependendo do grau de umidade do solo em que ocorre o realagamento, pode-se ter efeitos diferentes sobre intensidade de redução do solo. Se o realagamento for realizado com o solo ainda saturado, sem apresentar uma lâmina de água, esse manejo não terá efeito significativo sobre a intensidade de redução do solo. Se o realagamento for realizado em uma condição em que o solo estiver com umidade na capacidade de campo, esse manejo irá favorecer a entrada de oxigênio no solo durante a intermitência e diminuir os efeitos da redução do solo durante o ciclo da cultura (SOUSA et al., 2004). É o ponto de realagamento que o manejo da irrigação intermitente pode influenciar a emissão de  $\text{CH}_4$ , pois as alterações eletroquímicas na solução do solo neste período que irão afetar a produção do  $\text{CH}_4$ . Yu e Patrick (2004) alertaram para a necessidade de se controlar o manejo da irrigação, com drenagens, utilizando o Eh do solo como forma de mitigar a emissão de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ . Porém, o controle do Eh, para se estabelecer essa condição, parece ser inviável de ser realizado a campo, uma vez que, em geral, os agricultores não possuem qualificação para realizar este tipo de controle, além dos aspectos limitantes de medição já abordados anteriormente.

Embora o controle da irrigação possa efetivamente contribuir para controlar a emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009), os cultivos em condições de campo estão sujeitos as condições climáticas diversas. Assim, os resultados obtidos em experimentos a campo são diferentes e dificultam o posicionamento técnico a respeito dos parâmetros eletroquímicos que afetam as reações de oxiredução do solo, os quais podem contribuir no efluxo de  $\text{CH}_4$ . Utilizando-se cultivos em casa de vegetação, podem-se controlar esses fatores, monitorando o conteúdo de água no solo e medir os atributos eletroquímicos e seus efeitos sobre a emissão de  $\text{CH}_4$ , contribuindo então para auxiliar na tomada de decisão do controle do Eh e a emissão de  $\text{CH}_4$ . Cabe salientar que essa decisão

também depende de outros fatores que estão associados a esse manejo, tais como, efeitos sobre a disponibilidade de nutrientes, mudança na temperatura do solo, incidência de plantas invasoras e uma eventual diminuição do potencial produtivo (MEZZOMO, 2009).

A criação de um significado “prático” para o controle do grau de redução do solo no momento do realagamento (controle do Eh) pode ser feita com a medida do conteúdo de água do solo (BOUMAN, 2001). Como a disponibilidade de O<sub>2</sub> no solo é quem controla a atividade dos elétrons na solução do solo (ESSINGTON, 2005), o manejo da irrigação por alagamento intermitente tem como ponto crítico o grau de saturação do solo com água no momento do realagamento. O período entre o realagamento na irrigação intermitente é de 2 dias após a retirada da lâmina de água (BOUMAM, 2001). Segundo Andres et al. (2009) o realagamento deve ocorrer quando a primeira coroa de arroz estiver exposta no ponto de maior cota. Isto indicaria que, conforme o conteúdo de água no momento do realagamento, as condições do solo poderão estar reduzidas ou oxidadas.

Assim, o efeito do manejo da irrigação sem este controle não irá influenciar no estado de redução do solo e o manejo de irrigação intermitente não trará os benefícios desejados. Por este motivo, ocorrem divergências sobre o efeito do manejo de irrigação e o estado de redução do solo, com conseqüência nos atributos relacionados a grau de redução do solo, como a emissão de CH<sub>4</sub> (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). O uso de uma estratégia como o conteúdo de água no solo pode ser eficiente para que este manejo de irrigação atinja os objetivos desejados sem torná-lo moroso como o controle de Eh do solo no realagamento e sem afetar no potencial produtivo da cultura.

## 2.4 Características morfofisiológicas das plantas de arroz e a emissão de metano

As plantas de arroz cultivadas em áreas alagadas necessitam suprir suas raízes com oxigênio. O fornecimento de oxigênio às raízes ocorre por difusão em estruturas desenvolvidas pelo arroz, denominadas de aerênquimas (YOSHIDA, 1981). Essas estruturas são formadas pelo desenvolvimento de espaços apoplásticos superior ao comumente encontrados nos tecidos vegetais (EVANS, 2003). Esta estrutura fornece uma rota de baixa resistência a difusão de gases, favorecendo também a difusão dos gases produzidos no solo atingirem a atmosfera, como  $N_2O$ ,  $CO_2$  e  $CH_4$ . Desta maneira, a cultura do arroz influencia no efluxo de  $CH_4$  para a atmosfera (KAO-KNIFFIN et al., 2010).

Plantas que se desenvolvem em ambientes alagados emitem  $CH_4$  em função das suas características evolutivas que lhe permitiram desenvolver neste ambiente (AULAKH et al., 2000b). No caso do arroz, três características da cultura são responsáveis pela emissão de  $CH_4$ : 1) os exudatos radiculares liberados pelas plantas servem de substratos para as bactérias metanogênicas (AULAKH et al., 2001); 2) os aerênquimas facilitam a difusão do  $CH_4$  produzido no solo até a atmosfera (NOUCHI; MARIKO; AOKI, 1990) e; 3) o fornecimento de oxigênio nas raízes pelos aerênquimas possibilita oxidar a  $CO_2$  parte do  $CH_4$  produzido no solo (AULAKH et al., 2000a). A contribuição efetiva de cada uma destes fatores determina o potencial de emissão de  $CH_4$  de cada cultivar de arroz podendo ser utilizado como estratégia de mitigar  $CH_4$  na cultura do arroz.

As características morfofisiológicas das plantas podem ser homogêneas, o que dificulta a descoberta de atributos entre as cultivares que efetivamente diminuem a emissão de  $CH_4$  (JOABSSON; CHRISTENSEN, 2001). Por outro lado, o arroz possui mais de 80000 variedades, distribuídas em mais de 110 países, sendo a maioria da espécie *Oryza sativa* (YOSHIDA, 1981), o que possibilita encontrar materiais genéticos com distintas características morfológicas. A partir desta ampla base genética, podem ser encontradas características que auxiliam na limitação do processo de difusão do  $CH_4$  pela planta, sendo este atributo fundamental para a seleção de variedades com baixo potencial de emissão de  $CH_4$  (NOUCHI; MARIKO; AOKI, 1990, AULAKH et al., 2001).

Dentre as principais características do arroz, uma delas é a sua adaptação às condições anóxicas de cultivo (MAGALHÃES Jr. et al., 2004). A formação dos aerênquimas não ocorre apenas em condições anóxicas, porém estresses nutricionais, temperatura entre outros induzem a formação dos aerênquimas (JUSTIN; ARMSTRONG, 1991). No arroz existem aerênquimas mesmo quando cultivado nas condições aeradas; porém, quando cultivado sob condições anaeróbicas, os aerênquimas são maiores e mais desenvolvidos aumentando a capacidade de transporte de metano (CTM) e por sua vez, favorecer a oxidação do  $\text{CH}_4$  na rizosfera (YOSHIDA, 1981; DANNENBERG; CONRAD, 1999).

Os aerênquimas são classificados em esquizógeno ou lisígeno de acordo com o processo de formação (EVANS, 2003). O aerênquima esquizógeno resulta da separação das células e dos espaços intercelulares, devido ao arranjo diferencial das células que compõem os tecidos e pode ser encontrado mesmo em plantas bem supridas com oxigênio (EVANS, 2003). Por outro lado, o aerênquima lisígeno é formado a partir da morte das células em resposta às condições adversas impostas pelo ambiente, principalmente, a falta de oxigênio (COLMER, 2003; EVANS, 2003).

A entrada de oxigênio nas plantas de arroz ocorre pela superfície da folha e pelos estômatos ou por meio das lenticelas nos caules. Deslocam-se por difusão molecular ou por convecção gerada por pequenos gradientes de pressão (YOSHIDA, 1981; TAIZ; ZAIGER, 2009). O estímulo para o aumento do número e tamanho dos aerênquimas quando submetido a condições anóxicas ocorre pela atividade do 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) sintase e ACC oxidase (precursores da formação de etileno) produzindo etileno rapidamente. O etileno causa a morte e desintegração programada de células do parênquima cortical da raiz, formando aerênquimas do tipo lisígeno (COLMER, 2003; EVANS, 2003; TAIZ; ZAIGER, 2009). Portanto, durante a formação das raízes, estas não apresentam aerênquimas desenvolvidos, sendo seu desenvolvimento associado com o crescimento radicular e as condições anóxicas de cultivo. A ligação dos aerênquimas das raízes com os nós ocorrem por meio dos espaços intercelulares das células parenquimáticas. Isto indica que os nós da interseção das raízes com o caule são pontos de limitação à difusão de  $\text{CH}_4$  (GROOT et al., 2005).

No colmo existe um espaço interno entre os nós denominado de cavidade medular (YOSHIDA, 1981). A concentração de  $\text{CH}_4$  nesta cavidade alcança 2900 vezes as concentrações do ambiente (NOUCHI; MARIKO; AOKI, 1990). Esse

espaço varia principalmente em função das características genéticas das cultivares. Concentrações altas nestes tecidos aumentam a diferença de concentração de  $\text{CH}_4$  entre o interior da planta e o ambiente, aumentando a difusão de  $\text{CH}_4$  nos tecidos, mesmo que não existam canais “abertos” ao fluxo de gases do interior ao exterior das plantas. Próximo a epiderme do colmo contém canais vasculares, entre eles os aerênquimas, que são pequenos e que não apresentam ligações destes aerênquimas com aerênquimas de colmos superiores. Segundo Nouchi; Mariko e Aoki (1990), pequenas lenticelas presentes nos colmos são os locais onde predominam a saída de  $\text{CH}_4$  de dentro da planta para o ambiente.

A limitação na difusão destes gases entre estas estruturas irá estabelecer o potencial de difusão de  $\text{CH}_4$  por meio da planta (AULAKH et al., 2000a). A emissão de  $\text{CH}_4$  pelo arroz não se relaciona com o volume de aerênquimas das plantas (BUTTERBACH; PAPEN; RENNENBERG, 1999). A alta demanda de  $\text{O}_2$  pela planta cria um fluxo de massa de  $\text{O}_2$  para dentro da planta, dificultando à difusão do  $\text{CH}_4$  até a atmosfera (AULAKH et al., 2000c). O aumento da entrada de  $\text{O}_2$  nas plantas aumenta a disponibilidade de  $\text{O}_2$  na rizosfera, possibilitando aumentar a oxidação do  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$ . A capacidade de transporte de  $\text{CH}_4$  em variedades de arroz se relaciona com as características morfofisiológicas das cultivares (AULAKH et al., 2002). Observou-se o aumento da capacidade de transporte de  $\text{CH}_4$  com o aumento da densidade de perfilhos (AULAKH et al., 2002). Nouchi; Mariko e Aoki (1990) encontraram que a abertura estomática não estava envolvida com o efluxo de  $\text{CH}_4$ . Segundo Wang; Neue e Samonte (1997a e 1997b) existem microporos nas bainhas das folhas, diferente dos estômatos, que são responsáveis pela maior parte da transferência do  $\text{CH}_4$  da planta para a atmosfera. Em outro estudo, Wang; Neue e Samonte (1997b) avaliaram a concentração de  $\text{CH}_4$  na cavidade medular. A alta concentração de  $\text{CH}_4$  encontrada sugere que os aerênquimas que transportam  $\text{CH}_4$  estejam conectados com a cavidade medular; porém o autor não encontrou relação entre cavidade medular e a emissão de  $\text{CH}_4$ .

O carbono utilizado pelas bactérias na formação do  $\text{CH}_4$  provém em grande parte do carbono assimilado via fotossíntese (DANNENBERG; CONRAD, 1999). Assim, a alta taxa fotossintética da cultura no estágio de florescimento aumenta a liberação de carbono das plantas via exudatos radiculares, aumentando a produção de  $\text{CH}_4$  no solo (ZHANG et al., 2011). O aumento da concentração de  $\text{CH}_4$  na solução do solo aumenta a emissão de  $\text{CH}_4$  (NOUCHI; MARIKO; AOKI, 1990).

Fatores relacionados a fisiologia, como número de perfilhos, matéria seca de raízes e matéria seca da parte aérea foram positivamente correlacionadas com a emissão de CH<sub>4</sub> (MITRA et al., 1999). No entanto não foi avaliada neste trabalho a concentração de carbono na solução do solo, que pode estar relacionado com a maior disponibilidade de exudatos radiculares e produção de CH<sub>4</sub> no solo. Quanto maior for o metabolismo da planta com produção de matéria seca, maior será a liberação de exudatos radiculares, aumentando a produção do CH<sub>4</sub>, possibilitando aumentar as quantidades de CH<sub>4</sub> que chegam à atmosfera.

Um mecanismo de transporte de CH<sub>4</sub> pela planta de arroz foi proposto por Nouchi; Mariko e Aoki (1990) e por Wassmann e Aulakh (2000). O CH<sub>4</sub> dissolvido na água do solo é absorvido pelas plantas que, ao atingir o córtex da raiz, é rapidamente gaseificado. Na forma gasosa, uma troca entre a raiz e rizosfera acontece nas rachaduras ou aberturas em locais onde estão emergindo novas raízes e principalmente nas radículas. O CH<sub>4</sub> é transportado do córtex da raiz para o caule via difusão. A partir do caule, o CH<sub>4</sub> facilmente atinge a bainha das folhas na qual os microporos e estômatos são os responsáveis pela transferência do CH<sub>4</sub> até a atmosfera. As principais barreiras que limitam a passagem, ou que restringem a conexão entre os aerênquimas ocorrem nos nós. As regiões nodais do colmo são caracterizadas pelo pequeno número e tamanho das lacunas, que atuam como barreira estrutural transporte ascendente de CH<sub>4</sub>.

Assim, características das cultivares de arroz interferem na emissão de CH<sub>4</sub> devido às diferenças morfológicas que afetam a liberação de exudatos, produção de biomassa das plantas, condutância dos gases nos tecidos foliares e no potencial produtivo da lavoura (AULAKH et al., 2000c). Como a emissão de CH<sub>4</sub> varia conforme a variedade da planta utilizada (SINGH; SINGH; KASHYAP, 1998; AULAKH et al., 2000b; DAS; BARUAH, 2008) a determinação de suas características morfológicas pode ser importante na determinação de atributos de cultivares que relacionam com emissões de CH<sub>4</sub>, podendo ser usada como estratégia de mitigar o efluxo de CH<sub>4</sub>.

## **ESTUDO I**

### **EFLUXO DE METANO NO ARROZ IRRIGADO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS DE IRRIGAÇÃO**

#### **3.1 CAPÍTULO I**

##### **EFLUXO DE CH<sub>4</sub> EM ARROZ IRRIGADO SOB IRRIGAÇÃO CONTÍNUA E INTERMITENTE EM UM PLANOSSOLO DO RIO GRANDE DO SUL**

###### **3.1.1 INTRODUÇÃO**

O CH<sub>4</sub> é um gás de efeito estufa e influencia na fotoquímica da atmosfera (IPCC, 2007). Ele é produzido pela decomposição de compostos orgânicos em ambiente anaeróbico, onde inclui o cultivo do arroz irrigado por alagamento (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). O regime de irrigação por alagamento contínuo diminui a disponibilidade de oxigênio (CAMARGO et al., 1999). Nestas condições, bactérias anaeróbicas decompõem compostos orgânicos de baixo peso molecular produzindo CH<sub>4</sub> (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Assim, a cultura do arroz tem um alto impacto nas emissões de CH<sub>4</sub>, estimado em 25,6 Tg ano<sup>-1</sup> (YAN et al., 2009), o que representa 12% das emissões antrópicas de CH<sub>4</sub> (SMITH et al., 2007). Estima-se que o aumento da demanda por alimentos nas próximas décadas aumentem os efluxos de CH<sub>4</sub> em 16% até 2020 (SMITH et al., 2007).

A cultura do arroz irrigado usa um alto volume de água durante o ciclo para obter produtividades altas (MINAMI; YAGI, 1998). Estimativas indicam o uso de 5.000 a 15.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de água durante o seu ciclo (MACHADO et al., 2006; BELTRAME; LOUZADA, 1991). O alto volume de água usado na cultura do arroz se deve ao tipo de irrigação utilizada, com alagamento contínuo do solo (SOSBAI,

2010). Alternativas ao alagamento contínuo da irrigação na cultura do arroz têm sido desenvolvidas com diferentes objetivos, tais como: diminuir o volume de água usada pela cultura (ANDRES et al., 2009); diminuir os efeitos tóxicos de íons inorgânicos e orgânicos proporcionadas pelo alagamento contínuo (BOUMAN; LAMPAYAM; TUONG, 2007); aumentar a eficiência do uso da água (BOUMAN, 2001); diminuir riscos dos agrotóxicos atingirem os mananciais de água (MEZZOMO, 2009); e como prática mitigadora do efluxo de CH<sub>4</sub> para a atmosfera (SOLOMOM; QUIN; MANNING, 2007).

As lavouras de arroz irrigado, quando bem manejadas, aumentam a eficiência da utilização da água (STONE, 2005). Esse aumento pode ser proveniente do melhor aproveitamento das precipitações pluviais em áreas niveladas como também pela melhoria nas técnicas de irrigação (BOUMAN; LAMPAYAM; TUONG, 2007). Esse aumento na eficiência do uso da água é possível devido a redução no volume usado e a manutenção de altas produtividades, semelhantes ao manejo contínuo da irrigação (BOUMAN; LAMPAYAM; TUONG, 2007, MINAMIKAWA; SAKAI, 2005; MEZZOMO, 2009). O aumento da eficiência do uso da água com a utilização da irrigação intermitente pode chegar a 52% (MARTINI, 2010).

Os sistemas alternativos de irrigação visam intercalar o alagamento do solo com um período de ausência da lâmina de água (BOUMAN, 2001). O efeito esperado é a aeração do solo, que causa mudanças na química redox do solo (VALH; SOUSA, 2004), na atividade das bactérias metanogênicas e bactérias oxidantes de CH<sub>4</sub> (ZHANG et al., 2011), como também na disponibilidade de elementos e compostos tóxicos as plantas (HOU et al., 2000), possibilitando a diminuição do efluxo de CH<sub>4</sub> (ZHANG et al., 2011). Por este motivo, o manejo da irrigação é descrito no relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) como uma prática capaz de mitigar o efluxo de CH<sub>4</sub> no cultivo de arroz.

No entanto, este manejo de irrigação tem apresentado resultados diferentes quanto ao potencial de mitigação de CH<sub>4</sub>. Lima et al. (2002) encontrou aumentos de 12% das emissões de CH<sub>4</sub> no sistema de irrigação intermitente, enquanto Setyanto e Bakar (2005) encontraram diminuição de 62%. Nugroho et al. (1997) não encontraram efeito do sistema de irrigação sobre o efluxo de CH<sub>4</sub>. Estudos de longa duração realizado por Wassmann et al. (2000) avaliaram o potencial de mitigação pelo manejo intermitente da irrigação. Estes autores encontraram diminuição do efluxo de CH<sub>4</sub> em apenas dois anos dos quatro anos de avaliação. A conclusão do

autor é que o sistema de irrigação intermitente tem potencial de mitigação de CH<sub>4</sub> no arroz irrigado. Porém, ele relata que nos anos sujeitos a altas precipitações existe a possibilidade deste sistema não mitigar o efluxo de CH<sub>4</sub> em relação à irrigação contínua, devido manutenção do solo em condições reduzidas, mantendo altos efluxos de CH<sub>4</sub>.

A utilização da irrigação por alagamento intermitente do solo permite o controle da disponibilidade da água de irrigação; porém, não possibilita o controle da água fornecida via precipitação pluviométrica. Assim, precipitações durante o período da intermitência do alagamento irá acumular a água no solo, aumentando a eficiência da utilização da água (BOUMAN, 2001). Por outro lado, o solo irá permanecer continuamente alagado, mantendo-se reduzido, afetando um dos objetivos propostos deste sistema de irrigação, que é a alteração entre um ambiente anaeróbico e aeróbico (BOUMAN; LAMPAYAM; TUONG, 2007). Assim, altas precipitações durante o ciclo da cultura levam o solo irá permanecer continuamente reduzido, proporcionando condições eletroquímicas do solo favoráveis ao efluxo de CH<sub>4</sub>. Por este motivo são encontradas diferenças contrastantes nos resultados quanto ao potencial de mitigação da emissão de CH<sub>4</sub> pelo manejo intermitente da irrigação (NUGROHO et al., 1997; LIMA et al., 2002; SETYANTO; BAKAR, 2005, JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). Isso indica que as condições climáticas durante a estação de cultivo do arroz irão contribuir efetivamente na estratégia de utilizar o manejo intermitente da irrigação como prática mitigadora do efluxo de CH<sub>4</sub>.

O objetivo desse estudo foi verificar o efeito do regime de irrigação, contínua, intermitente e a banhos no efluxo de CH<sub>4</sub> em um Planossolo cultivado com arroz irrigado por alagamento na Depressão Central do Rio Grande do Sul.

### **3.1.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

As avaliações foram realizadas em um experimento instalado no campo experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, durante o ano agrícola de 2007/2008 e de 2009/2010. O solo do local é classificado como Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico. O delineamento

experimental utilizado foi inteiramente casualizado com três repetições no ano agrícola 2007/2008 e com duas repetições no ano agrícola 2009/2010.

Os tratamentos foram compostos por dois manejos de irrigação no ano agrícola 2007/2008, tratamento irrigação contínua e irrigação intermitente, e três tratamentos no ano agrícola 2009/2010, tratamento irrigação contínua, irrigação intermitente e irrigação em banhos. No tratamento manejo contínuo da irrigação, a lâmina de água foi constantemente mantida a 10 cm independente do ano agrícola. No tratamento manejo intermitente da irrigação, o solo foi alagado como na irrigação contínua; porém, permitiu-se a lâmina de água diminuir e, quando o solo estava apenas saturado, foi efetuada a reposição da lâmina de irrigação a 10 cm. Foram realizadas quatro reposições de água durante o ciclo da cultura na safra 2007/2008 e apenas uma reposição no ano agrícola de 2009/2010. No tratamento em banhos, foi adicionado lâminas de 20 mm ha<sup>-1</sup> de água, totalizando três irrigações. O manejo de irrigação por banhos foi orientado pelas condições meteorológicas locais, bem como pelo estágio fenológico da cultura e previsões de chuva, onde foi calculado o requerimento diário de água, através do cálculo da evapotranspiração, pela equação de Penman-Monteith.

As unidades experimentais foram construídas mediante o isolamento com taipas com altura de 0,6 m e 15 x 3,8 m de área, construídas previamente na entressafra com propósito de isolamento e compactação das mesmas para não haver interferência nos métodos de irrigação e contaminação entre as parcelas. Para evitar as perdas de água por infiltração lateral, foram construídas taipas ronda contornando os tratamentos com um canal, mantendo a água entre as parcelas a fim de manter a mesma carga hidráulica nas unidades experimentais. Foram instaladas régua no solo para controlar a altura da lâmina de irrigação, onde foram realizadas leituras diárias, cujos dados foram obtidos em Mezzomo (2009). A irrigação das parcelas foi efetuada de forma independente e automatizada cujas características do sistema encontram-se descritas em Mezzomo (2009).

O sistema de implantação da lavoura foi o método de cultivo convencional no ano agrícola 2007/2008, que consistiu no preparo do solo, realizado com duas gradagens sucessivas e aplainamento do solo com niveladora. A semeadura foi realizada no dia 08 de novembro de 2007 com densidade de 120 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da cultivar IRGA 422 CL. No ano agrícola 2009/2010, a semeadura do arroz foi realizada no sistema de cultivo direto no dia 13 de outubro 2009, com

densidade de 105 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da cultivar IRGA 422 CL. A adubação de base seguiu a recomendação da CQFS/NRS (2004) em ambos os anos de cultivo e tratamentos.

A coleta de CH<sub>4</sub> seguiu o método da câmara fechada estática (MOSIER, 1989). As câmaras possuíam dimensões de 0,60 x 0,60 m, construídas em alumínio e compostas de uma base de 0,25 m de altura, extensores de 0,20 ou 0,30 m de altura, e um topo de 0,20 m de altura. A instalação das bases foi realizada imediatamente antes do alagamento do solo, mediante sua inserção no solo (0,05 m de profundidade). Os topos das câmaras de coleta possuíam dois ventiladores movidos a bateria para realizar a homogeneização do ar no interior, evitando assim a formação de gradientes de concentração de CH<sub>4</sub> na câmara. A parte superior da câmara possuía um termômetro digital de haste com precisão de 0,1° C para o registro da temperatura do interior da câmara. Os extensores foram utilizados para ajustar a altura da câmara à altura das plantas de arroz ao longo do cultivo.

As amostras de ar do interior da câmara foram coletadas com seringas plásticas de polipropileno (20 mL) equipadas com válvulas para a retenção das amostras. Antes das coletas, as seringas foram limpas com gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) para evitar a presença de outros compostos gasosos. Após a limpeza, as seringas foram colocadas em sacos plásticos e depois acondicionadas em caixas de isopor até o momento das coletas. As coletas das amostras de ar foram realizadas aos 5, 10, 15, 20 e 25 minutos após o fechamento da câmara. Após as coletas, foram registradas a altura e a temperatura da lâmina d'água. Também, foram registradas as temperaturas do ar e a altura das plantas de arroz dentro da base da câmara. As coletas foram realizadas semanalmente ao longo da safra do arroz, para determinar a taxa de efluxo de CH<sub>4</sub> nas diferentes fases de desenvolvimento do arroz, nas condições edafoclimáticas do sítio de amostragem. Ao final de cada amostragem, as seringas foram novamente acondicionadas em caixas de isopor, contendo gelo em gel para resfriamento, e então enviado para o laboratório para análise por cromatografia gasosa.

No cultivo do arroz no ano agrícola 2007/2008, as amostras foram encaminhadas para o Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul onde foram realizadas a quantificação do CH<sub>4</sub> por cromatografia gasosa, utilizando um cromatográfico SHIMADZU GC-2014 (Mod. "Greenhouse"), equipado com três colunas empacotadas funcionando a 70°C, N<sub>2</sub> como gás de

arraste a um fluxo de  $26 \text{ mL min}^{-1}$ , injetor com alça de amostragem direta de 1 mL e temperatura de  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , detector de ionização de chama (FID) a  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . No cultivo do arroz na safra 2009/2010, a determinação as emissões de  $\text{CH}_4$  foram realizadas no Departamento de Solos da UFSM em Santa Maria (RS) com um equipamento igual ao descrito acima, operando nas mesmas especificações descritas anteriormente.

A quantificação do  $\text{CH}_4$  foi realizada no prazo máximo de 24 horas após a coleta. O fluxo de  $\text{CH}_4$  foi calculado com base na equação 4.

$$f = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{PV}{RT} \quad (\text{equação 4})$$

onde,  $f$  é fluxo de  $\text{CH}_4$  ( $\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ),

$Q$  é a quantidade do gás na câmara no momento da coleta ( $\mu\text{g CH}_4/\text{câmara}$ ),

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

$V$  é o volume da câmara (L),

$\Delta t$  é o tempo de amostragem,

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

$T$  é a temperatura no interior da câmara no momento da coleta ( $^\circ\text{K}$ ).

A taxa de aumento do gás no interior da câmara foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo de coleta. A partir dos valores de fluxo calculados foi estimada a emissão total do período do experimento pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de  $\text{CH}_4$  do solo com o período de avaliação (GOMES et al., 2009). As coletas foram realizadas no horário entre 9:00 às 11:30 hs, estabelecidas como emissões médias diárias (COSTA et al., 2008).

Imediatamente após a coleta de gases foi realizada a coleta da solução do solo. Utilizou-se uma seringa plástica de polipropileno (60 mL) conectada a uma mangueira de 3 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento que estava ligada a uma seção de cano de PVC de 20 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro o qual foi perfurado e recoberto com tela de poliamida com poros de  $80 \mu\text{m}$  e inserido no solo a 5 cm de profundidade antes do alagamento do solo. O pH e o potencial redox (Ag/AgCl) da solução do solo foram imediatamente medidos com potenciômetros portáteis, seguida de filtração em filtros Milipore<sup>®</sup>  $0,45 \mu\text{m}$  e acidificação com 1 mL

de solução de ácido clorídrico  $1 \text{ mol L}^{-1}$  para o armazenamento das amostras (Apêndice 1).

As características agronômicas das plantas utilizadas foram a estatura final e a produtividade de grãos, obtidos de Mezzomo (2009). Os dados referentes à eficiência do uso de água foram calculados, usando a razão entre produtividade de grãos e volume de água aplicado (MEZZOMO, 2009). A eficiência na mitigação de  $\text{CH}_4$  entre os sistemas de irrigação foram obtidos pela razão entre o efluxo total de  $\text{CH}_4$  e a produtividade dos grãos. Os dados climáticos utilizados, precipitação, temperatura média e radiação solar foram obtidos na estação meteorológica da UFSM, distante aproximadamente 1 km da área experimental e da estação meteorológica automática do Projeto Irriga distante 500 metros do experimento. Os dados de efluxo de  $\text{CH}_4$ , produtividade do arroz, emissão de  $\text{CH}_4$  por quilograma de arroz produzido e estatura de plantas foram submetidos a análise de variância e, quando o efeito foi significativo, foram submetidos ao teste de Tukey a 1% de significância ( $P \leq 0,01$ ).

### 3.1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### **Efeito do manejo de irrigação sobre os parâmetros eletroquímicos do solo**

No ano agrícola 2007/2008, aos cinco dias após o alagamento (DAA), os valores de pH da solução do solo estavam acima de 5,8 em todos os tratamentos (Figura 1a). Esse valor do pH da solução do solo é acima do valor de pH referência em ambiente aerado nesta área que é de pH 5,4, indicando que o solo estava parcialmente reduzido nesta data (Figura 1a). Os valores de pH da solução do solo aumentam com o alagamento do solo em função do consumo de prótons nas reações de redução do solo (PONNAMPERUMA, 1972). Aos 17 DAA os valores de pH da solução do solo foram de 6,3 em ambos os tratamentos (Figura 1a). No entanto, no tratamento irrigação intermitente os valores de pH foram menores aos 12, 33, 40, 47 e 60 DAA (Figura 1a). Nestas condições o manejo da irrigação afetou os valores de pH da solução do solo. O valor de Eh da solução do solo diminuiu inversamente ao aumento dos valores de pH (Figura 1b) sendo que aos 12 DAA o valor foi negativo no tratamento irrigação contínua (- 31 mV). A partir desta data, os valores de Eh da solução do solo oscilaram entre - 60 mV até + 64 mV até o final dos cultivos neste tratamento (Figura 1b). A partir do 33º DAA o tratamento irrigação intermitente apresentou valor de Eh da solução do solo maior do que o tratamento irrigação contínua, que permaneceu até 67º DAA. Neste período o manejo da irrigação influenciou nas condições eletroquímicas do solo, diminuindo o estado de redução do solo (Figura 1b), o que causou conseqüentemente o menor valor de pH do solo neste tratamento (Figura 1a). Em cultivos de arroz a campo, Towprayoon, Smakgahn e Poonkaew (2005) e Minamikawa e Sakai (2006) também encontraram que o manejo intermitente da irrigação influenciou nas condições eletroquímicas do solo.

Os valores de pH da solução do solo no ano agrícola 2009/2010 tiveram uma alta variação com valores mínimos de 5,2 e máximos de 6,1 (Figura 1c). Embora tenha ocorrido uma alta variação, o manejo de irrigação não afetou de maneira relevante os valores de pH do solo entre os tratamentos (Figura 1c). Os valores de Eh do solo também tiveram uma alta variação durante o ciclo da cultura, variando de + 106 até - 47 mV (Figura 1d), no entanto, não se percebe uma influência relevante do manejo de irrigação sobre os valores de Eh do solo. A alta precipitação pluviometria neste ano agrícola manteve todos os tratamentos totalmente alagados

durante todo o ciclo da cultura (Figura 2b). Em função da alta precipitação pluviométrica, as áreas das parcelas se mantiveram alagadas ou completamente saturadas com água durante todo o cultivo (Apêndice 02), tornando o estado de redução do solo praticamente igual entre os tratamentos (Figura 2d).

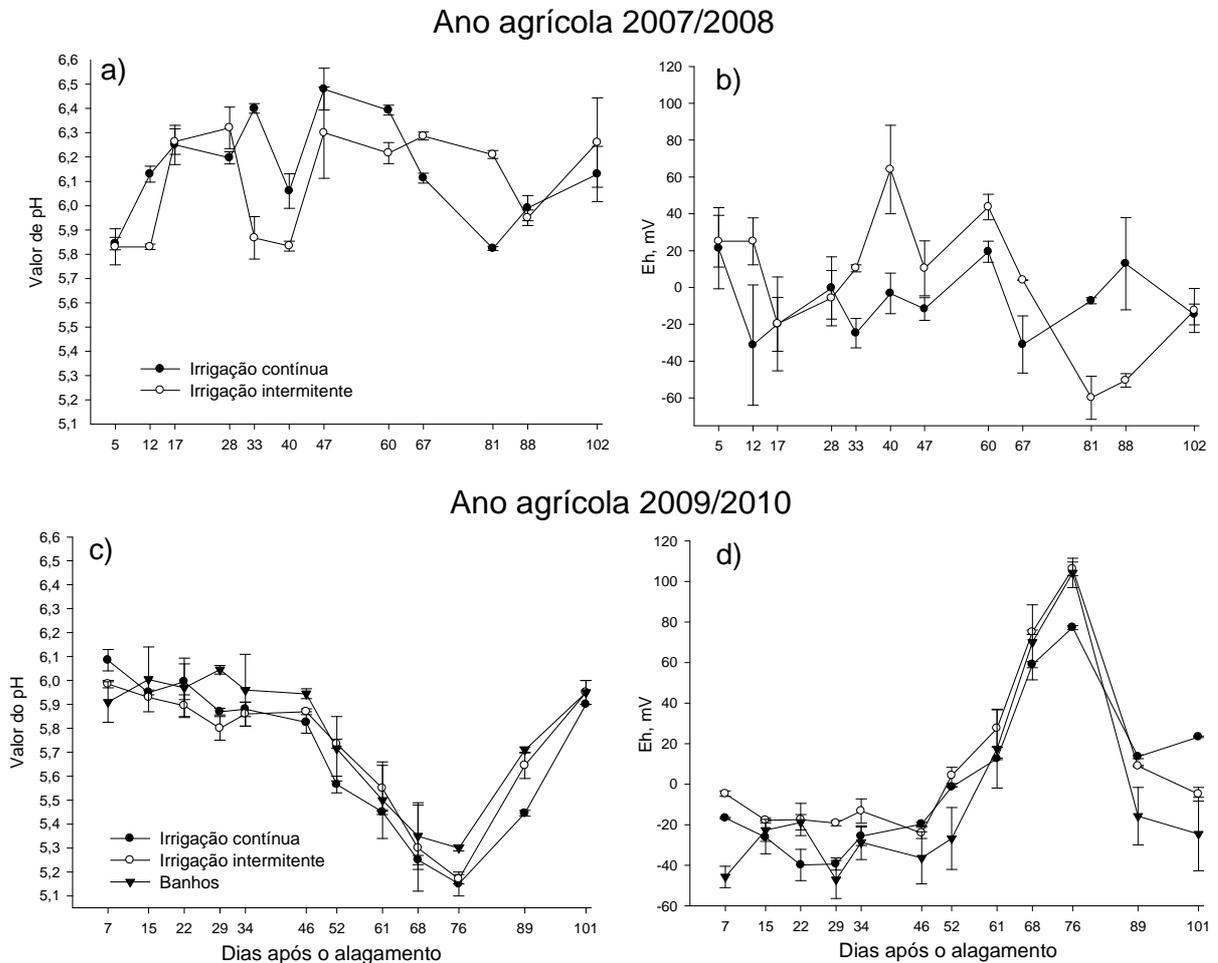


Figura 1 - Valores de pH (a) e (c) e Eh (b) e (d) da solução do solo em função do manejo de irrigação no arroz.

A precipitação pluviométrica durante o ano agrícola foi o fator que influenciou na resposta do manejo de irrigação sobre os atributos eletroquímicos no solo, como também foi verificado por Wassmann et al. (2000).

### Efeito do manejo da irrigação sobre o efluxo de metano

O efluxo de  $\text{CH}_4$  no ano agrícola 2007/2008 iniciou a partir do 5º dia após o alagamento do solo (DAA) (Figura 2a). As taxas aumentaram a partir do 12º DAA, causando um pico de efluxo de  $19 \text{ mg de } \text{CH}_4 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$  aos 28 DAA no tratamento irrigação intermitente. No tratamento IC, o efluxo foi de  $26,3 \text{ mg de } \text{CH}_4 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$  aos

33 DAA. Efluxos altos de CH<sub>4</sub> ocorrem entre 30 a 45 DAA (CAI et al., 1997) devido a sequência de redução do solo até a formação do CH<sub>4</sub> devido a mineralização da matéria orgânica do solo, aumentando a disponibilidade de carbono lábil nativo do solo, substrato para as bactérias metanogênicas (CAI et al., 1997). O sistema de cultivo adotado no ano agrícola 2007/2008 foi o sistema de cultivo convencional. Esse sistema favorece a disponibilidade de carbono as bactérias metanogênicas, aumentando os efluxos de CH<sub>4</sub> (COSTA, 2005). O início dos efluxos de CH<sub>4</sub> é distinto entre os solos em função das condições eletroquímicas (SILVA et al., 2011). Assim, se nota que os valores de Eh relatados na literatura como determinantes para o início da metanogênese são variados, com valores desde +70 mV (PETERS; CONRAD, 1996) até -150 mV (WANG et al., 1993a). Neste mesmo solo, Silva et al. (2011), com valores de Eh de +100 mV iniciou os efluxos de CH<sub>4</sub>. Nas condições do experimento, a partir da primeira coleta da solução do solo apresentou potencial de redução suficiente para a produção de CH<sub>4</sub> (Figura 1b).

O segundo pico de efluxo de CH<sub>4</sub> no ano agrícola 2007/2008 ocorreu na fase de florescimento da cultura, aos 67 DAA. As taxas de efluxo foram de 31,1 mg m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> no tratamento irrigação contínua e de 35,3 mg m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> no tratamento irrigação intermitente (Figura 2a). A intensa atividade fotossintética da planta neste estágio aumenta a liberação de exudatos radiculares (WASSMANN; AULAKH, 2000). Em iguais condições de redução do solo, a disponibilidade de substrato para as bactérias metanogênicas são os fatores que determinam a intensidade das taxas de efluxo de CH<sub>4</sub> (WASSMANN; AULAKH, 2000). Por este motivo, as taxas foram altas, independente do manejo de irrigação adotado nesta data (Figura 2a). No 102º DAA, as taxas de efluxo de CH<sub>4</sub> possivelmente diminuíram em função da redução da atividade fotossintética e senescência das raízes, dificultando a difusão do CH<sub>4</sub> até a atmosfera (CAI et al., 1997). Nesta fase, ocorre a supressão da irrigação, causando a diminuição da lâmina de água em todos os tratamentos e aumentando o suprimento de oxigênio, inibindo a atividade das bactérias metanogênicas e consequentemente no efluxo de CH<sub>4</sub> (Figura 1a).

No ano agrícola 2007/2008 o tratamento com manejo intermitente de irrigação foram submetidos à ausência de lâmina de água em quatro momentos durante o ciclo da cultura (Figura 2a). A ausência da lâmina de água ocorreu aos 14, 35, 52 e 83 DAA (Figura 2a), e os valores de Eh na coleta seguinte a ausência da lâmina de água foram de -19, +64, +43 e -50 mV respectivamente. A diminuição dos efluxos

de CH<sub>4</sub> ocorreu apenas entre o 33 DAA e 56 DAA (Figura 2a), em função do potencial de redução do solo ter alterado pelo manejo da irrigação, que aumentou os valores de Eh da solução do solo em relação ao tratamento irrigação contínua (Figura 2a). O aumento dos valores de Eh da solução do solo causa a diminuição da atividade das bactérias metanogênicas e o aumento da atividade das oxidantes de CH<sub>4</sub>, diminuindo assim a produção de CH<sub>4</sub> (ZHANG et al., 2011). Nestas datas ocorreu a diminuição do efluxo de CH<sub>4</sub> no tratamento irrigação intermitente (Figura 2a). Por outro lado, a intermitência de irrigação aos 14 DAA e 83 DAA não alteraram os valores de Eh da solução do solo entre os tratamentos e, portanto, não teve efeito sobre os efluxo de CH<sub>4</sub> (Figura 1a e 2a). Assim, a diminuição do efluxo de CH<sub>4</sub> pelo manejo intermitente da irrigação no arroz irrigado ocorre quando o mesmo influência nas condições eletroquímicas do solo, diminuindo o estado de redução do solo.

O efluxo de CH<sub>4</sub> no arroz no ano agrícola 2009/2010 iniciou aos 7 DAA (Figura 2b). Aos 15 DAA, ocorreu o primeiro pico de efluxo de CH<sub>4</sub> no tratamento irrigação contínua (Figura 2b). O segundo pico de efluxo ocorreu aos 34 DAA, fase de perfilhamento da cultura, com valores máximos de efluxo de CH<sub>4</sub> neste ano, independente do tratamento aplicado. No tratamento irrigação contínua e a banhos os valores de efluxo máximos de CH<sub>4</sub> foram iguais (23,0 mg m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) sendo que no tratamento irrigação intermitente o valor foi menor (19,3 mg m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>). No florescimento da cultura do arroz os efluxos de CH<sub>4</sub> foram menores comparado ao pico de efluxo de CH<sub>4</sub> ocorrido aos 34 DAA, que atingiu valores próximos a 20,0 mg m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> em ambos os tratamentos (Figura 2b). Neste ano, a homogeneidade das condições eletroquímicas do solo entre os tratamentos resultaram em pequenas diferenças entre o efluxo de CH<sub>4</sub>. A irrigação contínua teve um maior efluxo de CH<sub>4</sub> apenas aos 15, 22 e 29 DAA, mas não significativo, e nas demais coletas os efluxos foram iguais entre os tratamentos (Figura 2b).

A alta precipitação pluviométrica no segundo ano de avaliação (2009/2010) diminuiu a incidência de radiação solar média incidente durante o período de florescimento da cultura, 474 cal. cm<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup> (dados não apresentados), o que pode ter causado uma diminuição da taxa fotossintética, e com isso diminuindo a disponibilidade de substratos as bactérias metanogênicas (AULAKH et al., 2001). Como a radiação solar influencia a taxa fotossintética das plantas e que determina a sua produção de matéria seca (TAIZ; ZEIGER, 2009), ela irá determinar a produção e a liberação de compostos orgânicos pelas raízes (AULAKH et al., 2001). Como

resultado, o efluxo de CH<sub>4</sub> no ano agrícola 2009/2010 foi menor quando comparados ao ano agrícola 2007/2008, cuja radiação solar incidente na fase reprodutiva teve uma média de 499 cal. cm<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup> (dados não apresentados). Embora Mishra et al. (1997) encontraram que quanto mais negativo for o Eh, maior será o efluxo de CH<sub>4</sub>, essa relação não foi significativa no presente experimento, independente dos anos avaliados (Figuras 1 e 2). Assim, condições intensas de redução do solo não definem taxas máximas de efluxo de CH<sub>4</sub>, sendo que não se encontram relação entre estas variáveis (CAI et al., 1997; SILVA et al., 2011; ZHANG et al., 2011). As taxas máximas de efluxos são determinadas pela disponibilidade de substrato para as bactérias metanogênicas (AULAKH et al., 2000b). No presente experimento a taxa fotossintética deve ter controlado a liberação de exudatos radiculares, determinando as taxas máximas de efluxo neste ano, considerando que as condições de redução do solo foram adequadas a metanogênese (Figura 1a e 1b). Minamikawa e Sakai (2006), em um experimento a campo realizado durante dois anos, encontraram menor produtividade e efluxo de CH<sub>4</sub> no ano com alta precipitação pluviométrica, a qual os autores associaram a menor temperatura média durante o ciclo da cultura. Condições ambientais durante o ciclo determinam o potencial de produção da cultura (YOSHIDA, 1982), influenciando também nos efluxos de CH<sub>4</sub> (NEUE et al., 1992; WASSMANN et al., 2000; MINAMIKAWA; SAKAI, 2006).

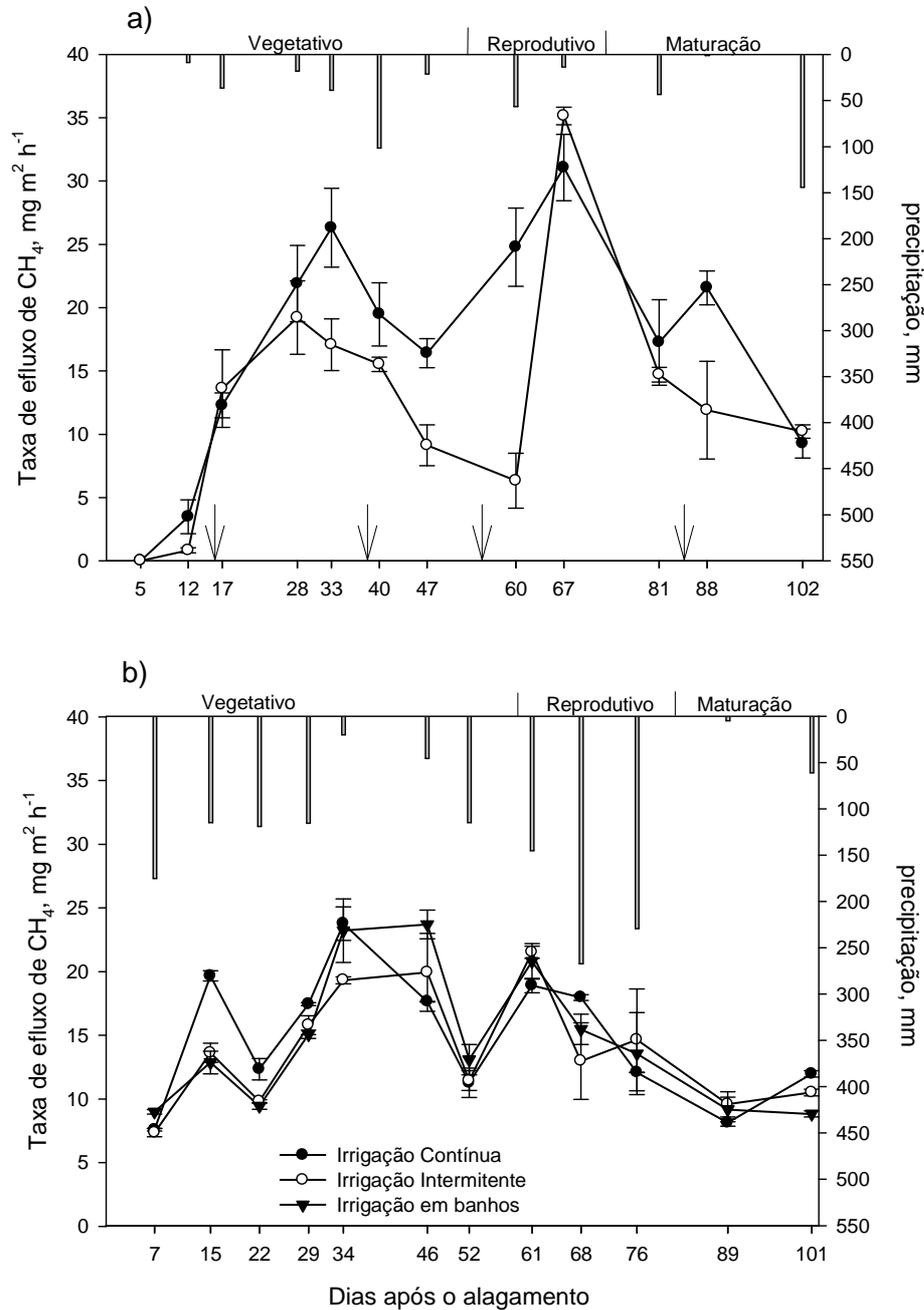


Figura 2 - Efluxo de CH<sub>4</sub> em diferentes sistemas de irrigação no arroz e a precipitação acumulada em cada coleta nos anos agrícola 2007/2008 (a) e 2009/2010 (b). As barras verticais indicam o desvio padrão. As setas sobre o eixo x indicam as datas em que ocorreram a ausência da lâmina de água sobre o solo.

A eficiência da irrigação intermitente como estratégia de mitigar o efluxo de CH<sub>4</sub> é baseada no controle da disponibilidade de água durante o cultivo (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). A diminuição do tempo em que o solo permanece reduzido,

alterando com um ambiente parcialmente aerado é uma estratégia de mitigação de efluentes de  $\text{CH}_4$  (SETYANTO; BAKAR, 2005; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). Porém, no cultivo do arroz irrigado no campo os ciclos de intermitência ficam dependentes das condições climáticas (Figura 2a e 2b). Assim, no ano agrícola 2007/2008, teve a ocorrência do fenômeno La niña (CPTEC, 2011), que é associada a baixa precipitação pluviométrica no Rio Grande do Sul. Neste período, a precipitação acumulada foi de 564 mm (Figura 2a). A baixa precipitação permitiu ocorrer quatro ciclos de intermitência da lâmina de água, sendo que em apenas duas ocasiões causou alteração no valor de Eh, mas suficientes para se obter a diminuição do efluxo de  $\text{CH}_4$ , equivalente a 25% no efluxo total de  $\text{CH}_4$  (Figura 2a). Sass et al. (1992) encontrou que a drenagem do solo durante dois dias foi suficiente para diminuir efetivamente o efluxo de  $\text{CH}_4$  no cultivo do arroz, cujo retorno das taxas de efluxo de  $\text{CH}_4$  ocorreu após duas semanas ao realagamento. Nas condições em que a drenagem ocorre efetivamente até o ponto de ausência da lâmina de água, os resultados são favoráveis a diminuição do efluxo de  $\text{CH}_4$  pelo manejo intermitente de irrigação, resultados que também foram encontrados por Sass et al. (1992), Wang et al. (2000) e Johnson-beebout et al. (2009).

No ano agrícola de 2009/2010 ocorreu o fenômeno El niño, causando o aumento no volume de chuvas no Rio Grande do Sul, mesmo sendo classificado como fraco (CPTEC, 2011), a precipitação acumulada foi de 1.411 mm durante o ciclo da cultura, o que manteve todos os tratamentos alagados durante o ciclo da cultura (Figura 2b). O efeito do manejo da irrigação no arroz sobre as condições eletroquímicas do solo foi nula, não causando diferenças no efluxo de  $\text{CH}_4$  durante o ciclo da cultura do arroz, independente do manejo de irrigação adotado no arroz (Figura 2b). Wassmann et al. (2000) também encontraram que anos com alta precipitação, o efeito do manejo intermitente de irrigação sobre o efluxo de  $\text{CH}_4$  é baixo, ou nulo. Em quatro anos de cultivo, dois anos não tiveram efeito do sistema de manejo da irrigação sobre o efluxo de  $\text{CH}_4$ . Por outro lado, mesmo nos anos com alta precipitação, o manejo intermitente de irrigação no arroz irá aumentar a eficiência do uso da água (BOUMAN, 2001), beneficiando a produção de arroz com menor uso dos recursos naturais.

Desta maneira, as condições climáticas ocorridas no ano agrícola 2007/2008 favoreceram o desenvolvimento da cultura do arroz com altos índices de radiação durante a fase de florescimento e temperaturas médias elevadas durante todo o

ciclo da cultura (Figura 3a). Os índices de radiação solar foram altos, com a média de 468,7 calorias  $\text{cm}^2 \text{dia}^{-1}$ . Diferenças climáticas entre os anos resultaram em diferenças no uso de água e, conseqüentemente, na eficiência do uso da água. A exigência de radiação solar varia em função da fase fenológica da cultura, sendo que a produtividade é fortemente influenciada pela alta exigência da radiação solar na fase de florescimento e maturação (STEINMETZ, 2004).

Embora a temperatura média e radiação solar entre os anos foram semelhantes, a radiação solar no ano agrícola 2009/2010 na fase de florescimento da cultura possivelmente teve papel importante na definição da produtividade do arroz (Tabela 3). Em dias nublados e com chuva, a radiação solar difusa é a predominante, enquanto que dias de sol a radiação solar direta predomina (CRUZ, 2010). As plantas utilizam apenas uma fração da radiação incidente no processo de fotossíntese, que possui comprimento de onda entre 0,4 e 0,7 micra (radiação fotossinteticamente ativa). Essa radiação é considerada como sendo de aproximadamente 50% da radiação global incidente (TAIZ; ZEIGER, 2004). No ano agrícola 2009/2010, mesmo com radiação solar média igual ao ano anterior, a radiação solar diminuiu na fase de florescimento, diminuindo a produtividade do arroz. A ocorrência das anomalias climáticas El niño e La niña afetam a produção do arroz, sendo anos com El niño ocorre a diminuição da produtividade, e nos anos em que ocorre o fenômeno La niña as produtividades são altas (STEINMETZ, 2004). A diminuição da atividade fotossintética pela planta também pode diminuir a liberação de exudatos radiculares pelas raízes e, conseqüentemente, diminuir a produção e o efluxo de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera, como foi observado nesse experimento (Figura 2a e 2b). Desta maneira, a diminuição do efluxo de  $\text{CH}_4$  em anos chuvosos ocorre devido a influência das condições ambientais (Le MER; ROGER, 2001). Em função das oscilações climáticas entre os anos, também ocorre oscilações no potencial de efluxo da cultura do arroz (WASSMANN et al., 2000; Le MER; ROGER, 2001).

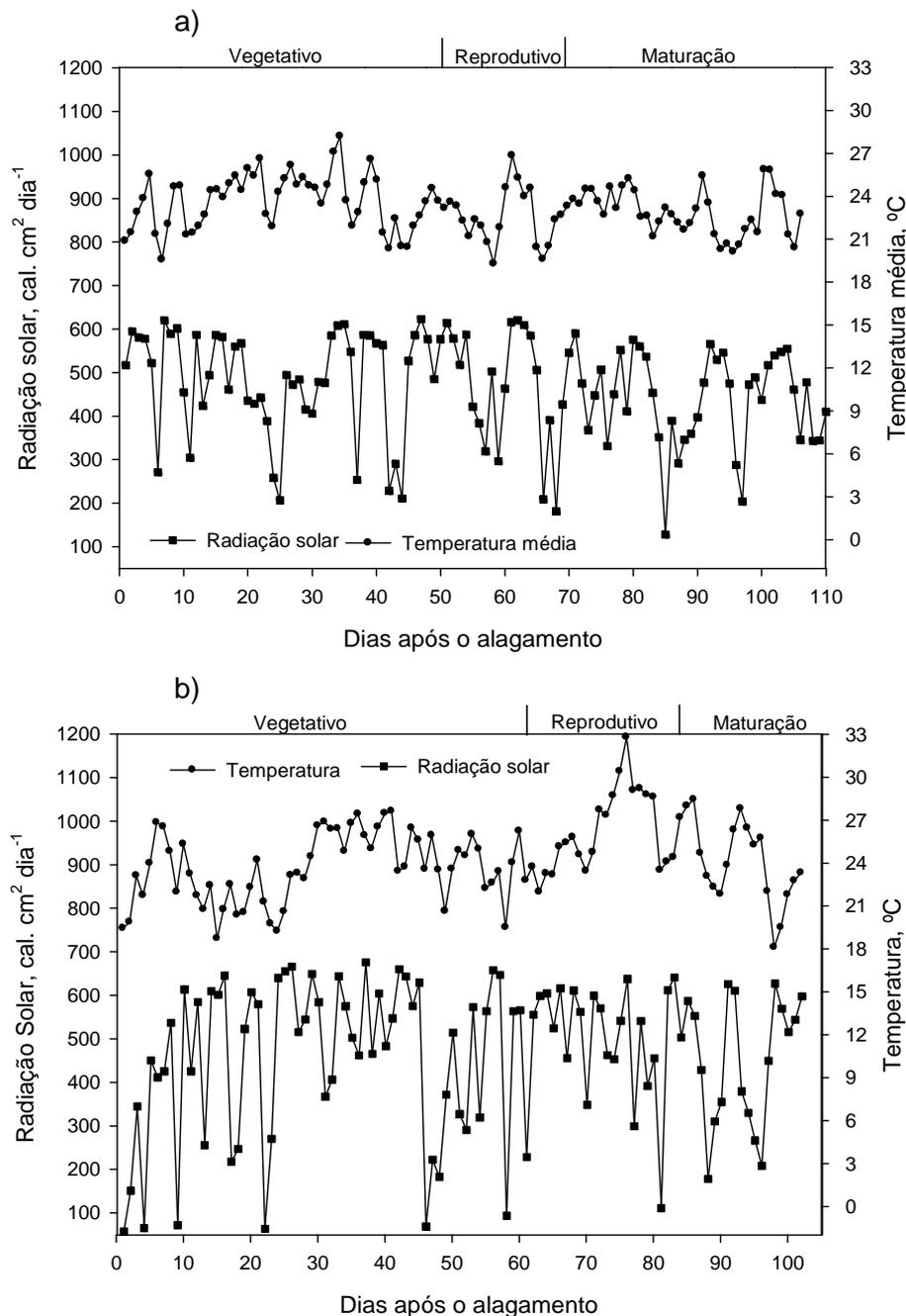


Figura 3 - Temperatura média e radiação solar durante o ciclo do arroz cultivado em Santa Maria, a) ano agrícola 2007/2008, temperatura média de 23,2  $^{\circ}\text{C}$  e radiação solar média de 468,7  $\text{cal. cm}^2 \text{ dia}^{-1}$ ; b) ano agrícola 2009/2010, temperatura média de 24,2  $^{\circ}\text{C}$  e radiação solar média de 463,4  $\text{cal. cm}^2 \text{ dia}^{-1}$ .

Embora a produtividade do arroz tenha sido menor no ano agrícola 2009/2010 em função de fatores ambientais como o El niño (Tabela 3), a produtividade foi igual entre os diferentes manejos de irrigação, independente dos anos agrícolas (Tabela 3). A ausência de resposta a produtividade do arroz em função do manejo da

irrigação também foi encontrado por Bouman e Tuong (2001); Lima et al. (2003); Setyanto e Bakar (2005); Bouman; Lampayam e Tuong (2007); Mezzomo (2009) e Zschornack (2011). Outros fatores, como a estatura de plantas não apresentaram diferença estatística em função do manejo de irrigação adotado (Tabela 3). Minamikawa e Sakai (2006) também não encontraram diferenças nos parâmetros agrônômicos do arroz avaliados em função do manejo da irrigação.

O efluxo de CH<sub>4</sub> por kg de arroz produzido foi maior no tratamento irrigação contínua do que no tratamento irrigação intermitente no ano agrícola 2007/2008 (Tabela 3). Porém, a quantidade de CH<sub>4</sub> emitida neste ano no tratamento irrigação contínua foi semelhante a quantidade total emitida por kg de arroz produzido no ano agrícola 2009/2010, independente do tratamento de irrigação neste ano (Tabela 3). As condições ambientais dos cultivos irão determinar a eficiência da produção de arroz com menor poluição atmosférica, sendo que o manejo intermitente de irrigação apenas será sinônimo de eficiência quando as condições atmosféricas permitirem a diminuição dos efluxos de CH<sub>4</sub>, possibilitando assim o aumento da eficiência do uso da água em produzir arroz com menor impacto ambiental.

Tabela 3 - Produtividade do arroz, efluxo total de CH<sub>4</sub>, emissão de CH<sub>4</sub> por quilograma de arroz produzido, estatura de plantas em função dos sistemas de irrigação nos anos agrícolas 2007/2008 e 2009/2010.

Irrigação	Safra	Produtividade <sup>2</sup>	Total CH <sub>4</sub> <sup>1</sup>	CH <sub>4</sub> /kg <sup>-1</sup> arroz <sup>1</sup>	Estatura de plantas
		kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	g	cm
Contínua	07/08	9.247 <sup>ns</sup>	423,0a	45,6a	81,6 <sup>ns</sup>
Intermitente		9.209 <sup>ns</sup>	315,0b	34,2b	78,4 <sup>ns</sup>
Contínua	09/10	7.057 <sup>ns</sup>	340,8 <sup>ns</sup>	47,4 <sup>ns</sup>	67,4 <sup>ns</sup>
Intermitente		6.748 <sup>ns</sup>	312,0 <sup>ns</sup>	47,2 <sup>ns</sup>	68,0 <sup>ns</sup>
Banho		6.443 <sup>ns</sup>	322,9 <sup>ns</sup>	51,6 <sup>ns</sup>	66,8 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> não significativo; <sup>(1)</sup> Diferença significativa entre os dois tratamentos pelo Tukey ( $p \leq 0,01$ ); <sup>(2)</sup> dados obtidos em Mezzomo (2009).

Os resultados obtidos neste experimento permitem inferir que anos agrícolas em que as condições ambientais são favoráveis a altas produtividades, precipitações dentro da média, o sistema de manejo de irrigação intermitente é eficiente em diminuir os efluxos de CH<sub>4</sub>. Nessas condições, o sistema permite uma oxidação parcial do solo devido a remoção completa da lâmina de água, enquanto no sistema

de irrigação por alagamento contínuo, o alto grau de redução do solo favorece máximas taxas de efluxo de CH<sub>4</sub>.

### **3.1.4 CONCLUSÃO**

A prática da irrigação intermitente é eficiente em mitigar o efluxo de CH<sub>4</sub> no cultivo do arroz irrigado quando as condições climáticas permitem a ausência da lâmina de água durante o cultivo.

A eficiência em mitigar o efluxo de CH<sub>4</sub> na cultura do arroz pelo manejo intermitente da irrigação irá depender das condições eletroquímicas do solo durante o período de intermitência da irrigação.

O manejo intermitente da irrigação não diminui a produtividade do arroz.

## **2.5 CAPÍTULO II**

### **SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO NA CULTURA DO ARROZ COMO PRÁTICA MITIGADORA DE EFLUXO DE METANO**

#### **3.2.1 INTRODUÇÃO**

A mudança global no clima tem alertado os pesquisadores que buscam alternativas para a produção de alimentos com baixo efluxo dos gases de efeito estufa. O CH<sub>4</sub> é o terceiro gás em importância para o efeito estufa global, perdendo apenas para o vapor de água e o CO<sub>2</sub> (BAIRD, 2002). Sua concentração na atmosfera mais que dobrou desde a era pré industrial, passando de 715 ppb para 1774 ppb em 2005 (SOLOMOM; QUIN; MANNING, 2007). Seu potencial de absorção de luz infravermelha é 25 vezes maior que o CO<sub>2</sub> e seu tempo médio de residência atmosférica é 10 vezes inferior ao CO<sub>2</sub> (BAIRD, 2002). Embora sua concentração seja baixa na atmosfera, a alta capacidade de absorver luz infravermelha o destaca como sendo um dos gases mais importantes a serem mitigados para conter o aquecimento global.

A atividade agrícola contribui com o fluxo antrópico de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (SMITH et al., 2007). No entanto, ela apresenta potencial para diminuir os efluxos desses gases, por meio de técnicas de manejo da cultura mitigadoras desses gases. As principais fontes de efluxo de CH<sub>4</sub> para a atmosfera são a produção e utilização de energia fóssil, aterros sanitários, atividade pecuária, queima de biomassa e o cultivo de arroz irrigado (BAIRD, 2002). Em escala global, o arroz irrigado por alagamento é responsável, aproximadamente, pela emissão de 12% do efluxo anual desse gás para a atmosfera (SMITH, et al., 2007).

O inventário brasileiro das emissões de gases de efeito estufa estima o efluxo de 269 Gg de CH<sub>4</sub> apenas decorrentes do cultivo do arroz irrigado, representando 1,4% do total (MCT, 2009). Nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, a área cultivada com arroz irrigado por alagamento representa 71 % da área total

cultivada no Brasil, com efluxo estimado de 185,37 Gg de CH<sub>4</sub> (EMBRAPA, 2002). O alto efluxo de CH<sub>4</sub> nesses estados é em decorrência do manejo de irrigação por alagamento com lâmina de água contínua (MCT, 2009). O alagamento do solo durante a irrigação do arroz causa a diminuição do oxigênio molecular livre, pela baixa taxa de difusão do O<sub>2</sub> na água (Le MER; ROGER, 2001), tornando o ambiente anaeróbico. Esse tipo de irrigação é utilizada por apresentar vantagens no processo de produção do arroz, como o aumento do pH do solo e da disponibilidade de nutrientes (SILVA et al., 2008), melhora o controle das plantas invasoras, pois a água funciona como uma barreira a germinação de sementes de plantas invasoras que estão localizadas no solo (BORRELL; GARSIDE; FUKAI, 1997).

A irrigação por alagamento com lâmina de água intermitente é um manejo de irrigação alternativo a irrigação contínua (BOUMAN; LAMPAYAM; TUONG, 2007). Neste tipo de irrigação, o solo é alagado como na irrigação contínua, porém, deixa-se que a lâmina de água diminuir até tornar-se ausente, iniciando-se assim um novo ciclo de alagamento. Esse sistema também é denominado de aeração múltipla (BOUMAN, 2001). Assim, o sistema pode variar quanto ao grau de umidade do solo com que é reiniciado o alagamento. A maneira como essa irrigação é manejada pode determinar o estado de oxidação do solo em cada ciclo de alagamento, determinando as condições eletroquímicas favoráveis ou não para a emissão de CH<sub>4</sub> (Le MER; ROGER, 2001). A intensidade de redução dos solos, medida em Eh, pode ser controlada pelo manejo intermitente da irrigação (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009) e com isso ser utilizada como estratégia de mitigar a emissão de CH<sub>4</sub> dos solos (WASSMANN et al., 2000; TOPRAYOON et al., 2005; SMITH et al., 2007; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). Em condições de campo, a dificuldade em utilizar o controle do Eh como estratégia de mitigação de efluxo de CH<sub>4</sub> ocorre em função das condições ambientais durante os ciclos de alagamento (Capítulo 1). Uma chuva neste período afeta o conteúdo de água no solo, mantendo o solo reduzido. Esse fator pode ser crítico e afetar a química redox do solo, permitindo assim o efluxo de CH<sub>4</sub> (WASSMANN et al., 2000).

A relação entre a quantidade de água no solo e a emissão de CH<sub>4</sub> tem sido objeto de estudo por diversos autores em diferentes regiões produtoras de arroz no mundo. Na China, Yang e Chang (1998) determinaram que valores inferiores a 23% de água no solo, o efluxo de CH<sub>4</sub> foi insignificante, enquanto que as taxas máximas de emissão de CH<sub>4</sub> ocorreram com umidades superiores a 67%. Esses autores

estabeleceram a estratégia do controle do potencial redox, utilizando o manejo da água de irrigação, como forma de mitigar o efluxo de CH<sub>4</sub>. No entanto, o controle do potencial redox é difícil de ser realizado em áreas de cultivo a campo, devido às limitações na forma de controle da água de irrigação em um ambiente tão diverso como a produção de arroz, que acabam afetando o suprimento de água e oxigênio, tendo efeito no potencial redox do solo.

Os experimentos realizados a campo estão sujeitos as condições climáticas locais (Capítulo I), assim os resultados obtidos a campo são diferentes e específicos em cada local, o que dificulta um posicionamento preciso a respeito dos limites nos parâmetros eletroquímicos que afetam as reações de oxiredução do solo, os quais podem contribuir no efluxo de CH<sub>4</sub>. Utilizando-se de cultivos em casa de vegetação, podemos controlar esses fatores, monitorando o conteúdo de água no solo e medindo os atributos eletroquímicos e seus efeitos sobre a emissão de CH<sub>4</sub>, contribuindo então para auxiliar na tomada de decisão quanto ao controle do Eh e o efluxo de CH<sub>4</sub>.

O objetivo do trabalho foi avaliar o efluxo de CH<sub>4</sub> no arroz cultivado em casa de vegetação submetidos a diferentes manejos de irrigação e relacionar com parâmetros agronômicos do arroz.

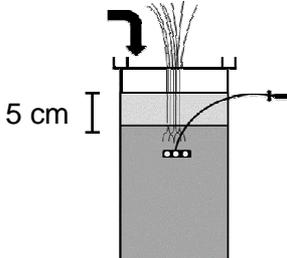
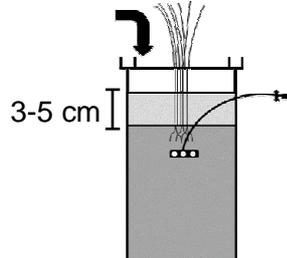
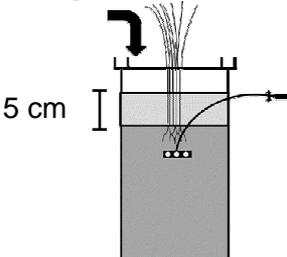
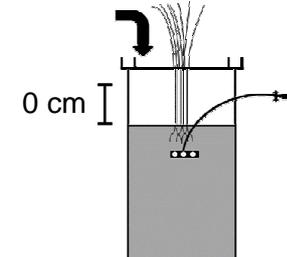
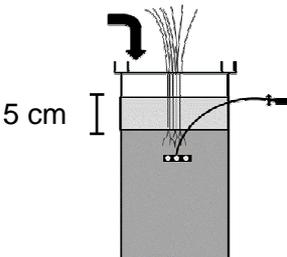
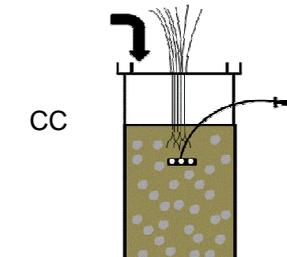
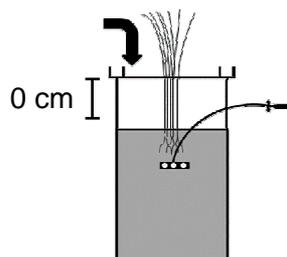
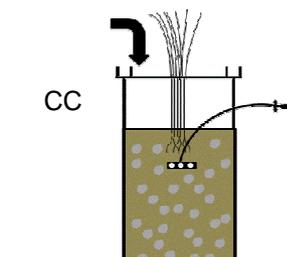
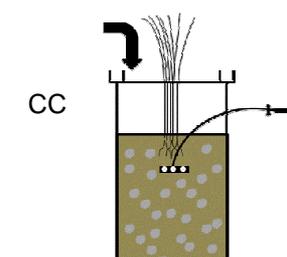
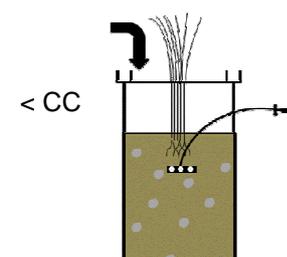
### 3.2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em vasos na casa de vegetação no Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS. O solo utilizado foi um Planossolo Háplico hidromófico típico (EMBRAPA, 2006) coletado no campo experimental do Departamento de Solos da UFSM. O solo foi coletado na camada de 0-10 cm, seco ao ar, peneirados em malha de 2 mm e acondicionados em vasos com 7 kg<sup>-1</sup> de solo e 4 repetições em delineamento inteiramente casualizado. O solo apresentava as seguintes características: argila 470 g kg<sup>-1</sup>; silte 190 g kg<sup>-1</sup>; areia 340 g kg<sup>-1</sup>; carbono 35 g kg<sup>-1</sup>; pH em água 4,7; Ca trocável 6,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg trocável 0,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; P disponível 14,6 mg dm<sup>-3</sup>, metodologia determinada segundo Tedesco et al. (1995).

O experimento constituiu-se de cinco tratamentos descritos na Tabela 4. A determinação da água disponível na capacidade de campo do solo e quando saturado foi determinada segundo a metodologia descrita em Embrapa (1997).

O experimento foi instalado no dia 17/10/2009 quando foram transplantadas 12 plântulas da cultivar Avaxi CL. No quarto dia após o transplante do arroz foi realizado o desbaste, deixando seis plântulas por vaso e aplicado os tratamentos de irrigação. Foram adicionados no momento da instalação do experimento:  $\text{CaCO}_3$  para elevar o pH a 5,5; macronutrientes P e K ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo) e micronutrientes Cu, Zn, B, S nas doses de 1,5, 2,5, 1,5, 15  $\text{mg kg}^{-1}$  de solo respectivamente, todos na forma de reagentes PA. A adição de N foi na forma de  $\text{NH}_4^+$  na dose de  $105 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo. O controle da irrigação foi realizado por meio de pesagens dos vasos diariamente e adição de água destilada quando atingido o peso de realagamento de cada tratamento (Tabela 4).

Tabela 4 - Esquema ilustrativo dos tratamentos de irrigação adotados na cultura do arroz no experimento em casa de vegetação.

Tratamento	Situação inicial	Realagamento
Irrigação contínua – IC		
Altura da lâmina de água	5 cm 	3-5 cm 
Irrigação intermitente com reinício do alagamento com o solo saturado - ISS		
Altura da lâmina de água	5 cm 	0 cm 
Irrigação intermitente e reinício do alagamento com o solo inferior a capacidade de campo - ISC		
Altura da lâmina de água	5 cm 	CC 
Irrigação com solo saturado e reinício da irrigação com o solo inferior a capacidade de campo – SSC		
Altura da lâmina de água	0 cm 	CC 
Irrigação com adição de água diária para manutenção na capacidade de campo – CC		
	CC 	< CC 

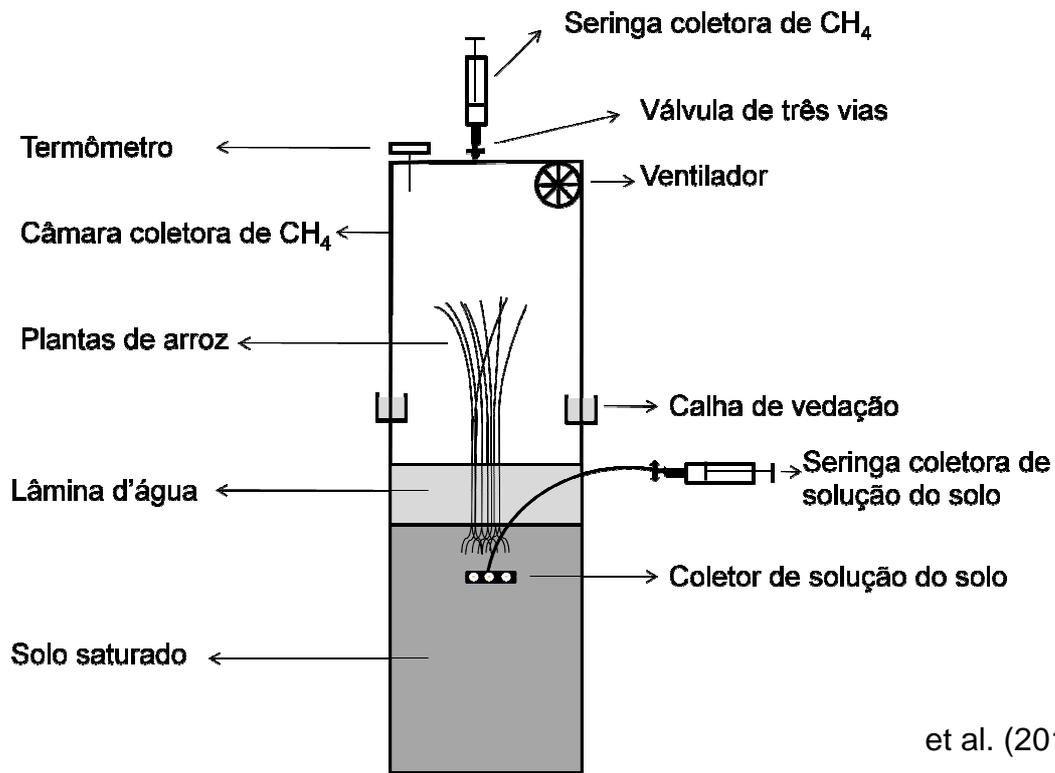


Figura 4 - Representação da câmara utilizada para a coleta das amostras de ar no sistema solo-água-atmosfera do experimento em casa de vegetação submetida a diferentes manejos de irrigação no arroz.

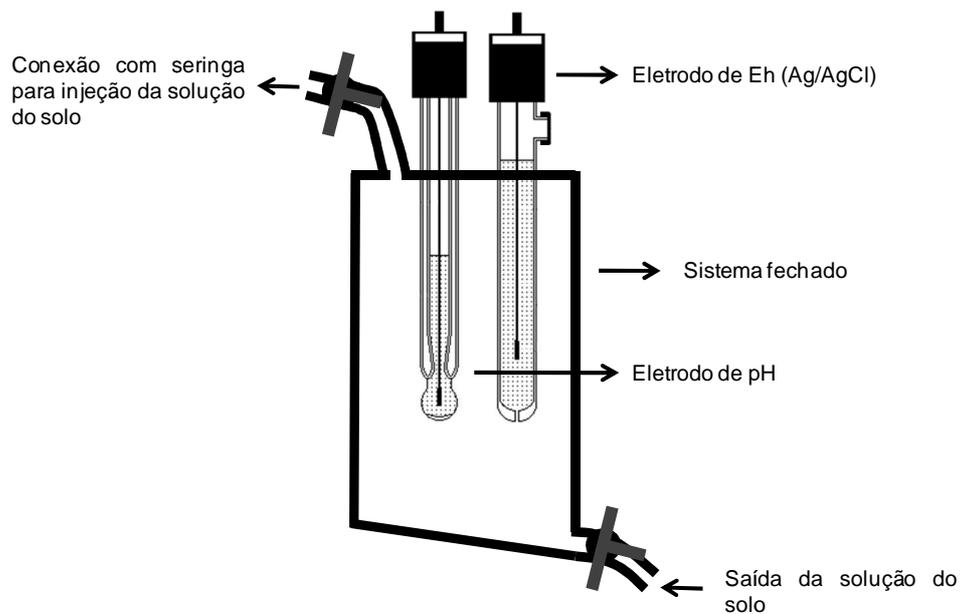


Figura 5 - Sistema para determinação dos valores de pH e Eh da solução do solo no experimento em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação no arroz.

A coleta do CH<sub>4</sub> foi realizada utilizando o método da câmara fechada estática (MOSIER, 1989). A câmara é composta de um tubo de PVC fechado e acoplada no topo dos vasos no momento das coletas, vedado por um canal preenchido com água. A parte superior da câmara possui um ventilador para a homogeneização do ar e uma válvula que possibilita a coleta do ar (Figura 4). As coletas foram realizadas entre o horário das 8:30 e 11:00 hs da manhã, em intervalos de sete dias desde o alagamento do solo até a fase de florescimento e espaçadas a cada 15 dias, a partir do florescimento até final do ciclo da cultura (117 dias). A coleta foi realizada em intervalos de 5 min, nos tempos 5, 10, 15 e 20 min, com o auxílio de uma seringa plástica (20 mL) previamente tratada com N<sub>2</sub>. O ar foi analisado por cromatografia gasosa em cromatógrafo SHIMADZU GC-2014 (Mod. "Greenhouse"), equipado com três colunas empacotadas funcionando a 70°C, N<sub>2</sub> como gás de arraste a um fluxo de 26 mL min<sup>-1</sup>, injetor com alça de amostragem direta de 1 mL e temperatura de 250 °C, detector de ionização de chama (FID) a 250 °C. O fluxo de CH<sub>4</sub> foi calculado com base na equação 4.

$$f = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{PV}{RT} \quad (\text{equação 4})$$

onde,  $f$  é fluxo de metano ( $\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ),

$Q$  é a quantidade do gás na câmara no momento da coleta ( $\mu\text{g CH}_4/\text{câmara}$ ),

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

$V$  é o volume da câmara (L),

$\Delta t$  é o tempo de coleta,

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

$T$  é a temperatura no interior da câmara no momento da coleta (°K).

A taxa de aumento do gás no interior da câmara foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo de coleta. A partir dos valores de fluxos calculados foi estimada a emissão total do período do experimento pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de CH<sub>4</sub> do solo (GOMES et al., 2009).

No momento da coleta do ar foi coletada a solução do solo utilizando um coletor colocado no momento da instalação do experimento (Apêndice 1). O coletor foi formado por cano de PVC perfurado, com 15 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro, localizado a 10 cm de profundidade, recoberto com tela de poliamida com

poros de 80 µm e conectado a uma mangueira de pvc de 3 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento para a parte externa do vaso. Imediatamente após a coleta, a solução foi colocada em um suporte vedado para a determinação do pH e Eh (Figura 5). O pH foi determinado utilizando um potenciômetro de eletrodo combinado portátil. O Eh foi determinado utilizando um potenciômetro com eletrodo do tipo Ag/AgCl com anel de platina. A conversão desses valores de potencial medidos para Eh (potencial padrão de hidrogênio) foi obtida somando 220 mV às leituras. Os parâmetros agrônômicos avaliados foram o número de perfilhos e a área foliar em cada coleta, estatura final de plantas, produtividade de grãos e rendimento do grão ao final do cultivo. No momento da aplicação dos tratamentos foram selecionadas duas plântulas para realizar o acompanhamento da área foliar, até o final dos cultivos (YOSHIDA, 1981). Foi realizada a medição do comprimento da folha (CF) e sua largura em meia altura (LF) e determinado a área foliar utilizando a seguinte fórmula:

$$AF(\text{cm}^2) = (LF*0,75)*CF. \quad (\text{equação 5})$$

Onde  $AF$  é a área era foliar em  $\text{cm}^2$ ,

$LF$  é a largura na posição mediana da folha, e

$CF$  é o comprimento da lâmina da folha.

Os resultados do efluxo total de  $\text{CH}_4$  foram submetidos à análise da variância ( $p < 0,05$ ), e as diferenças entre as médias de solos foram avaliadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). A relação entre a taxa de efluxo de  $\text{CH}_4$  e as características agrônômicas foi avaliada pela significância dos coeficientes de correlação ( $r$ ) linear de Pearson. Foi determinado o desvio médio padrão para os resultados das taxas de efluxo de  $\text{CH}_4$  e da área foliar do arroz nos diferentes manejos de irrigação durante o ciclo cultura.

### 3.2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efluxo  $\text{CH}_4$  iniciou no 25º dia após o alagamento do solo (DAA) nos tratamentos irrigação contínua (IC) e intermitente com o realagamento com o solo saturado (ISS) (Figura 6). O início da produção e efluxo de  $\text{CH}_4$  ocorre após o consumo de íons inorgânicos aceptores de elétrons (Le MER; ROGER, 2001), cujos valores de Eh variam entre +70 mV a -250 mV (PETERS; CONRAD, 1996; NEUE et

al., 1997). No tratamento IC, o valor de Eh mínimo foi em torno de +50 mV, suficiente para ocorrer a emissão de CH<sub>4</sub> (Figura 7). A diferença nos valores absolutos de Eh encontrados na literatura e a do experimento pode ter ocorrido em função do experimento ter ocorrido em casa de vegetação e não no campo. Em casa de vegetação pode ocorrer difusão de oxigênio na parede lateral do vaso, afetando os valores de Eh da solução do solo. Também, a determinação do Eh foi realizada imediatamente após a coleta da solução do solo e não *in loco*. Embora o sistema de coleta e determinação do Eh estivesse em ambiente “fechado”, devido ao tempo de extração da solução realizada com a seringa (variou entre 5 a 10 mim), pode ter ocorrido uma oxidação parcial da solução do solo, atingindo valores acima dos encontrados na literatura (PETERS; CONRAD, 1996; NEUE et al., 1997). É importante considerar que a solução do solo foi amostrada a partir de um coletor posicionado a 10 cm de profundidade e que a condição redox do solo posicionado em outras partes do vaso pode ser diferente (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). Os dados de potencial redox foram medidos com o eletrodo de Pt, os quais são predominantemente negativos e precisam ser somados a 220 mV para serem convertidos para Eh (potencial padrão de hidrogênio), o que nem sempre é indicado na literatura.

Os menores valores de Eh ocorreram no tratamento IC, enquanto que os maiores valores foram no tratamento irrigação intermitentes com o realagamento com o solo inferior a capacidade de campo (ISC). Os valores de Eh nos tratamentos IC e ISS atingiram valores mínimos aos 25 DAA, valores entre +50 e +100 mV e se mantiveram até o final do experimento. O tratamento ISC apresentou valores de Eh acima deste valor (Figura 7). Os demais tratamentos não foram medidos pela ausência de condição de saturação do solo para a coleta da solução do solo. Assim, as condições eletroquímicas do solo nesses tratamentos não seriam consideradas favoráveis a produção e efluxo de CH<sub>4</sub> (Figura 6), devido a ausência de anaerobiose (ZHANG et al., 2011).

As condições eletroquímicas do solo foram afetadas pelo manejo da irrigação e resultaram em baixo efluxo de CH<sub>4</sub> nos tratamentos ISC, SSC e CC (Figura 6 e Figura 7). O processo de produção de CH<sub>4</sub> no solo ocorre pela redução do carbono lábil do solo pelas bactérias metanogênicas (Le MER; ROGER, 2001). A condição ambiental favorável a metanogênese ocorre em potenciais de redução do solo inferior ao potencial de redução de íons inorgânicos aceptores de elétrons (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,

$\text{Mn}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$  e  $\text{SO}_4^-$ ) (PONNAMPERUMA, 1972). Desta maneira, a intermitência da irrigação diminuiu o potencial de redução do solo a valores acima de +200 mV, oxidando estes compostos do solo (Figura 7). O tempo necessário para que estes compostos novamente se reduzam é o fator tamponante para atrasar as condições ambientais favoráveis a metanogênese e com isso retardar o efluxo de  $\text{CH}_4$ . A eficiência neste manejo é atingida com um sincronismo entre a redução do solo e a diminuição da lâmina de água. A supressão da irrigação tem demonstrado que o mesmo retarda a redução do solo e diminui o efluxo de  $\text{CH}_4$  (ZHANG et al., 2011). O arroz por ser uma planta semi-aquática, tem rendimento de grãos afetado quando o conteúdo de água no solo for inferior a saturação do solo (BOUMAN; LAMPAYAM; TUONG, 2007), sendo que a produtividade de grãos diminui com aumento do tempo da intermitência do alagamento. O realagamento do solo deve ser realizado com o solo ainda saturado, como foi encontrado no tratamento ISS, indicando que o manejo adequado da irrigação permite diminuir a redução do solo sem afetar o potencial produtivo da cultura.

Nos tratamentos IC e ISS, os fluxos de  $\text{CH}_4$  foram crescentes até 46<sup>o</sup> DAA (Figura 6). Esses picos de efluxos de  $\text{CH}_4$  são associados aos resíduos de carbono orgânico nativo do solo, fonte de substrato para as bactérias metanogênicas (NEUE et al., 1997), aliado ao estágio de perfilhamento da cultura, que permite maior escape do  $\text{CH}_4$  produzido no solo até a atmosfera (AULAKH et al., 2000b). Embora esse pico tenha sido pouco intenso, diversos autores relatam a existência deste pico de emissão de  $\text{CH}_4$  entre o 35 e 45<sup>o</sup> DAA (NEUE et al., 1997; SETYANTO et al., 2002, AULAKH et al., 2000a, b e c).

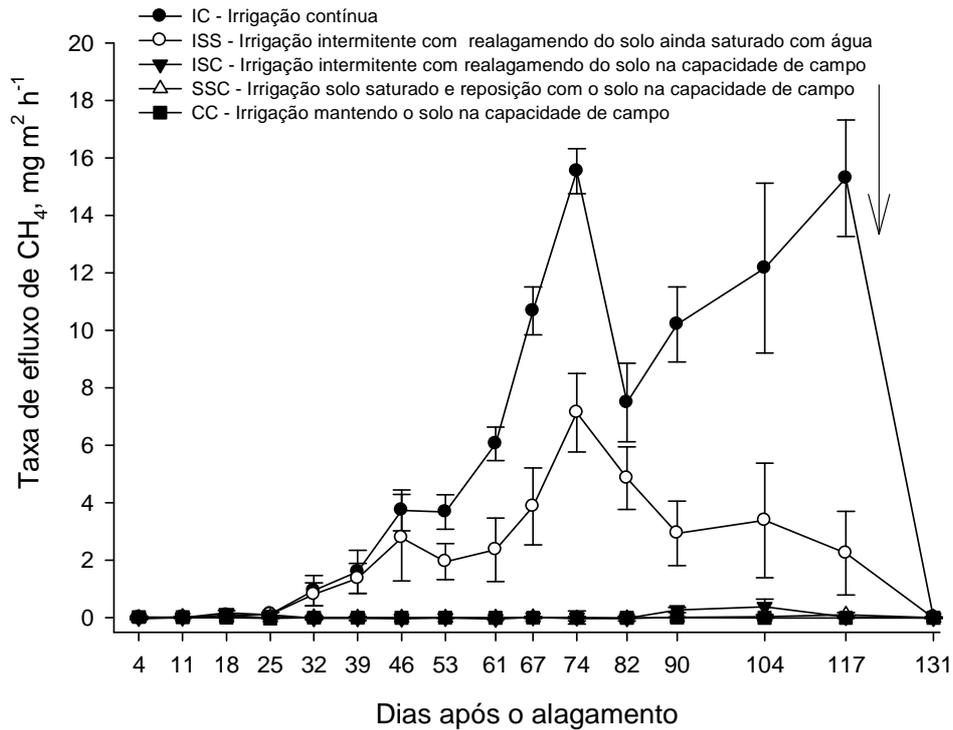


Figura 6 - Taxa de efluxo de CH<sub>4</sub> no experimento em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação no arroz. A seta indica o momento que os tratamentos foram drenados.

O máximo efluxo de CH<sub>4</sub> ocorreu no 74<sup>o</sup> DAA sendo que neste mesmo dia ocorreu o florescimento das plantas de arroz nos tratamentos IC, ISS (Figura 6). No tratamento IC, ocorreu outro pico intenso de efluxo de CH<sub>4</sub>, na fase de maturação dos grãos (Figura 6). Nesta fase, a alta liberação de exudatos radiculares, em decorrência da senescência das raízes do arroz, e ao alto potencial de redução do solo, favoreceram as bactérias metanogênicas, aumentando o efluxo de CH<sub>4</sub> (Figura 6). Como as condições eletroquímicas do solo foram favoráveis a metanogênese neste período, resultaram em um pico intenso de efluxo de CH<sub>4</sub>. Em condições de campo, próximo desta fase é realizada a drenagem da área para a colheita do arroz, diminuindo o potencial de redução e o efluxo de CH<sub>4</sub> comparado com o nosso estudo em casa de vegetação em que o solo não foi drenado. Altos efluxos na fase de florescimento foram encontrados por Singh; Singh e Kashyap (1998). Os autores associaram este pico a alta exsudação de compostos orgânicos pelas raízes, que favoreceu a produção de CH<sub>4</sub> pelas bactérias metanogênicas. Também, Aulakh et al. (2000a) verificaram que o pico da emissão de CH<sub>4</sub> ocorreu no estágio reprodutivo,

sendo atribuída além da alta liberação de exudatos radiculares, a alta capacidade de transporte de CH<sub>4</sub> pelas plantas de arroz nesse estágio.

Os tratamentos irrigação solo saturado com reposição de água na capacidade de campo (SSC) e tratamento irrigação com o solo apenas na capacidade de campo (CC), os efeitos dos manejos de irrigação provocaram um atraso na época de florescimento da cultura. Nestes tratamentos, o florescimento iniciou-se aproximadamente 14 dias após os tratamentos com IC, ISS e ISC. Como as condições eletroquímicas não foram favoráveis a metanogênese (Figura 7), não ocorreu efluxo significativo de CH<sub>4</sub> nestes tratamentos. Aos 125<sup>o</sup> dias de alagamento o solo foi drenado, e aos 131<sup>o</sup> foi realizada a coleta de matéria seca e de CH<sub>4</sub>. Nessa coleta não teve efluxo de CH<sub>4</sub>, independente do manejo de irrigação utilizado (Figura 6). Drenagens múltiplas têm diminuído o efluxo de CH<sub>4</sub> de 41% (TYAGI; KUMARI; SINGH, 2010) até 88% (SASS et al., 1992). Na ausência completa do alagamento, Sass et al. (1992) não encontraram efluxos significativos, com valores inferior a 0,5 mg m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>. Em um experimento em casa de vegetação, visando avaliar o efluxo de CH<sub>4</sub> em diferentes manejo de irrigação, Mishra et al. (1997) também encontraram valores insignificantes de efluxo de CH<sub>4</sub> quando o solo não foi alagado durante o cultivo.

Em ambiente aerado de cultivo, os efluxos de CH<sub>4</sub> são ausentes (PETERS; CONRAD, 1996). No entanto, foram encontrados dois pequenos picos de efluxo de CH<sub>4</sub> no tratamento ISC (Figura 6). O primeiro pico aconteceu aos 32 dias após o alagamento e o segundo no final do ciclo da cultura, aos 90 e 104<sup>o</sup> dias após o alagamento. O primeiro pico pode ser associado ao tempo em que o solo permaneceu saturado com a lâmina de água inicial, resultado semelhante encontrado por Mishra et al. (1997). Em decorrência das condições ambientais e das baixas taxas transpiratórias no início do experimento, os ciclos entre os realagamentos foram grandes, permitindo a redução do solo e conseqüente produção de CH<sub>4</sub>. No segundo pico, as altas temperaturas aumentaram a demanda diária de água, tornando os ciclos de realagamento intensos (aproximadamente dois dias). Adicionalmente, a fase de desenvolvimento da cultura possibilitou uma alta liberação de exudatos radiculares, contribuindo para a pequena emissão de CH<sub>4</sub> nesse tratamento, possivelmente pela presença de zonas anaeróbicas no solo, causando efluxos de CH<sub>4</sub> (Figura 6).

As taxas de efluxo de CH<sub>4</sub> não tiveram correlação significativa com os valores de Eh (Figura 7). A ausência de relação entre estas variáveis também foram encontrados por Zhang et al. (2011) em um ano agrícola. A alta variação no conteúdo de água no solo entre os tratamentos causa um aumento significativo nos valores do Eh (Figura 7), superior aos valores de Eh que ocorrem a metanogênese. Também, nem sempre há um sincronismo entre o valor do Eh e os demais fatores que determinam a produção do CH<sub>4</sub> (como a disponibilidade de carbono), afetando a relação. Em experimentos a campo, onde se tem realizado apenas uma drenagem durante o ciclo, vários autores tem encontrado correlações negativa significativas entre os valores de Eh e o efluxo de CH<sub>4</sub> (SASS et al., 1992; HOU et al., 2000), provavelmente porque a relação ocorre com dados obtidos em um determinado momento do curso da redução e de produção de CH<sub>4</sub>. No tratamento IC, os valores de Eh do solo foram baixos, inferiores a +100 mV, com exceção da primeira e da segunda coleta; porém as taxas de emissão de CH<sub>4</sub> variavam de valores próximos a zero até 15,5 mg m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>. As maiores taxas foram encontradas nos estágios de florescimento e maturação dos grãos, enquanto que as menores taxas de emissão de CH<sub>4</sub> foram encontradas nos estágios de desenvolvimento inicial da planta de arroz (Figura 6). Embora as condições eletroquímicas do solo estavam favoráveis a metanogênese, o efeito da planta foi o principal fator que controlou o efluxo de CH<sub>4</sub> nesta fase, seja em função da planta ser o meio de transporte de CH<sub>4</sub> produzido no solo ou pela liberação de compostos orgânicos pelas raízes, fonte de carbono para as bactérias metanogênicas (AULAKH et al., 2000a). Bharati et al. (2001) também encontraram baixo efluxo de CH<sub>4</sub> na fase inicial, sendo o efluxo limitado pelas estrutura da planta de arroz, que apresenta baixa capacidade de transporte de CH<sub>4</sub> até a atmosfera, enquanto que os efluxos máximos ocorreram na fase de florescimento do arroz.

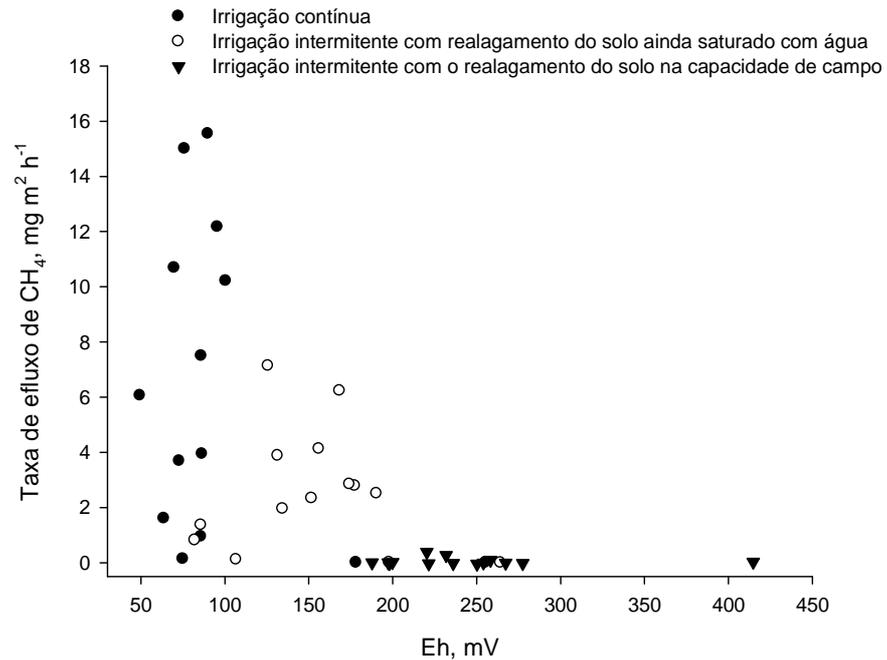


Figura 7 - Relação entre o valor de Eh da solução do solo e efluxo de CH<sub>4</sub> no arroz irrigado em casa de vegetação nos diferentes manejos de irrigação.

A quantidade de CH<sub>4</sub> emitida no tratamento IC foi de 20,1 g m<sup>-2</sup> enquanto que a ISS teve um efluxo acumulado de 6,2 g m<sup>-2</sup> (Tabela 5). O manejo intermitente da irrigação, mesmo com o realagamento do solo ainda saturado (ISS) permitiu a mitigação na emissão de CH<sub>4</sub> em 70%. Por outro lado, a irrigação intermitente em que o ponto de realagamento o solo apresentava oxidado no sistema (ISC), a diminuição do efluxo total de CH<sub>4</sub> foi de 99% em relação ao tratamento com realagamento do solo ainda saturado (ISS). Isso indica que o manejo intermitente da irrigação é uma prática eficiente como mitigadora de emissão de CH<sub>4</sub>. No entanto, o seu efeito é maior quando o realagamento do sistema tiver um conteúdo de água no solo inferior a capacidade de campo (Tabela 5). Nesses casos, a irrigação intermitente é eficiente em diminuir a emissão de CH<sub>4</sub> a níveis próximos a zero, como também foi relatado por Sass et al. (1992). O ponto negativo deste tratamento foi o efeito sobre a produtividade do arroz (Tabela 5). Para não haver prejuízos na produtividade do arroz, Bouman e Tuong (2001) estabeleceram que o conteúdo de água no solo não deve ser inferior ao grau de saturação do solo, principalmente nos estádios de diferenciação da panícula e na fase de florescimento. A irrigação intermitente com o realagamento com o solo seco (ISC) diminui a produtividade de

grãos enquanto que a irrigação intermitente com o realagamento com o solo saturado obteve as maiores produtividades (Tabela 5).

Este dado é extremamente importante e corrobora com Bouman e Tuong (2001), pois indica que a oxidação do solo durante a intermitência do arroz causa importantes transformações na química redox do solo e, conseqüentemente, na produtividade do arroz (Tabela 5). Um dos efeitos está relacionado com a disponibilidade dos elementos no solo (PONNAMPERUMA, 1972; BOUMAN; TUONG, 2001). A oxidação do solo durante o ciclo da cultura diminui a disponibilidade de vários elementos, como o P, N além de cátions trocáveis como  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ . Ao permitir a entrada de  $O_2$  no solo, o N antes acumulado na forma de  $NH_4^+$  em ambiente anaeróbico sofre nitrificação, oxidando a  $NO_3^-$ , reduzindo posteriormente a  $N_2O$  por desnitrificação com o realagamento do solo (HOU et al., 2000; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). Isto pode ter causado a diminuição da produtividade no tratamento ISC comparado com os tratamentos ISS e IC. Também pode contribuir para o aumento das emissões de  $N_2O$ , outro gás de efeito estufa, com alto potencial de aquecimento global, cerca de 298 vezes ao  $CO_2$  (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009).

Em experimentos com vasos em casa de vegetação, Minamikawa e Sakai (2005) não encontraram diferenças na produção de biomassa nos diferentes manejos de irrigação. Por outro lado, ocorreram aumentos na produção de arroz, sendo que as maiores produções foram alcançadas no tratamento irrigação intermitente, comparado ao método tradicional de cultivo (irrigação contínua). Entretanto, o excesso de drenagem durante o ciclo do arroz causou a diminuição da produtividade do arroz (CAI et al., 1997). Assim, o alto número de fatores que a irrigação influencia, dada as condições locais de cada experimento, irá determinar o efeito da irrigação intermitente sobre a produção do arroz e a escolha do tipo de irrigação deverá considerar todos os efeitos sobre o sistema produtivo. Estudos ainda deverão ser realizados para que sejam elucidados os reais efeitos dos sistemas de irrigação sobre cada fator que influencia no potencial produtivo das plantas. Um exemplo são as áreas de cultivo de arroz em taipas no RS. Esse sistema por apresentar um difícil manejo da água e o solo é heterogeneamente irrigado durante o ciclo da cultura, pode afetar o potencial redox. Condições climáticas anuais também influenciam nas taxas de efluxo e a produtividade do arroz (Capítulo I).

Tabela 5 - Efluxo acumulado de CH<sub>4</sub>, massa de grãos e taxa média de transpiração do arroz cultivado em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação

Tratamento	Efluxo acumulado	Massa de grãos total	Transpiração
	CH <sub>4</sub> g m <sup>2</sup>	g vaso <sup>-1</sup>	mL dia <sup>-1</sup>
IC	20,14a <sup>1</sup>	70,2ab	801a
ISS	6,20b	86,9a	914a
ISC	0,23c	50,9bc	802a
SSC	0,05c	32,5c	686b
CC	0,04c	10,9d	468b
Coeficiente de variação	23,2	18,8	11,1

<sup>1</sup> Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (P>0,05); IC – Irrigação contínua; ISS – Irrigação intermitente com realagamento do solo ainda saturado com água; ISC – Irrigação intermitente com realagamento do solo na capacidade de campo; SSC - Irrigação com solo saturado e reinício da irrigação com o solo inferior a capacidade de campo e CC - Irrigação com adição de água diária para manutenção na capacidade de campo.

Os resultados das avaliações da medida da área foliar do arroz demonstraram que o tratamento IC obteve o maior índice (Figura 8). A taxa de efluxo de CH<sub>4</sub> neste tratamento também foi maior, indicando a relação direta com efluxo de CH<sub>4</sub>. O tratamento ISS atingiu o pico de área foliar aproximadamente aos 90 dias de alagamento, juntamente com o tratamento ISC (Figura 8). Mesmo assim, a área foliar dos dois tratamentos foram similares durante todo o experimento. As diferenças quanto ao potencial de emissão de CH<sub>4</sub> foram altas, indicando que as condições eletroquímicas do solo são fatores responsáveis pela produção de CH<sub>4</sub> no solo, enquanto que o potencial de emissão de CH<sub>4</sub> está relacionado com as características das plantas, como a liberação de exudatos radiculares e ou tecidos condutores de CH<sub>4</sub> até a atmosfera, que determinam as taxas máximas de efluxo de CH<sub>4</sub> (AULAKH et al., 2000b). O efluxo CH<sub>4</sub> atinge seus máximos efluxos quando se tem uma combinação de fatores, baixo Eh e alta disponibilidade de carbono lábil para as bactérias metanogênicas, mesmo assim os efluxos ainda podem ser baixos (Figura 6 e 7). O papel da planta parece complementar o efeito das condições de solo favoráveis a produção de CH<sub>4</sub>. Desta maneira, para se obter práticas de manejo visando mitigar o efeito estufa, estas devem atingir principalmente os fatores de solo que causam a produção de CH<sub>4</sub> e posterior os fatores responsáveis pela condução do CH<sub>4</sub> até a atmosfera (ZHANG et al., 2011).

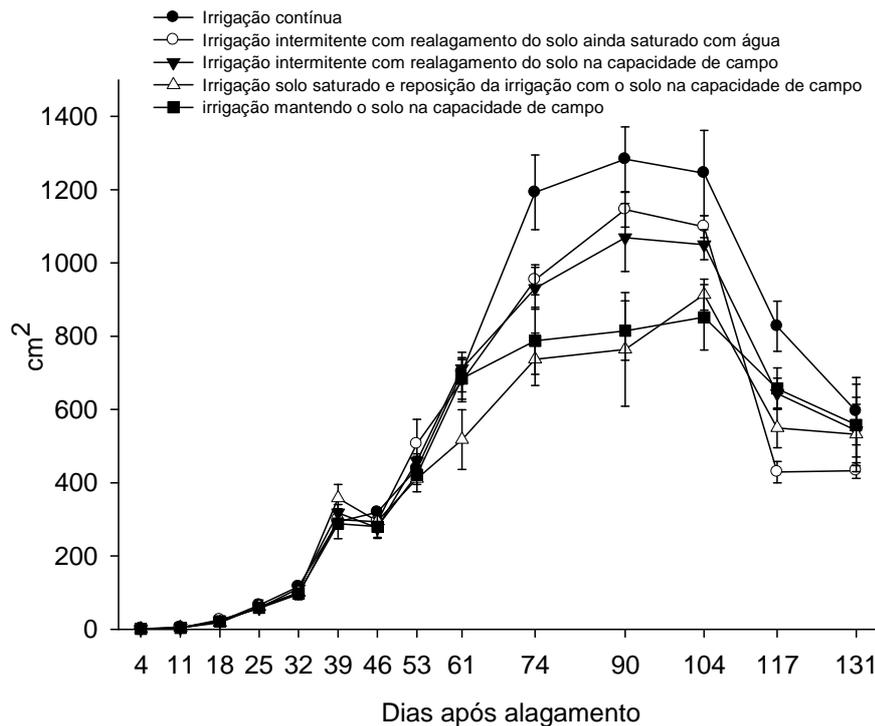


Figura 8 - Área foliar do arroz no experimento em casa de vegetação submetido a diferentes manejos de irrigação.

A máxima área foliar ocorreu aos 104 dias de alagamento nos tratamentos que não sofreram alagamento, demonstrando que estes tratamentos também sofreram um atraso no seu ciclo em função do tipo de irrigação utilizado (Figura 8). Após esse período, as plantas de arroz entraram em senescência, diminuindo a sua área foliar. Neste estágio ocorreu um segundo pico de efluxo de  $\text{CH}_4$  nos tratamentos IC e ISS. Estes picos foram tão intensos quanto o pico máximo atingido na fase de florescimento. Isso indica que, havendo condições eletroquímicas favoráveis no solo no período de senescência das plantas, as bactérias metanogênicas utilizam parte do carbono liberado pelas raízes nesta fase para a produção de  $\text{CH}_4$ , o que favoreceu um efluxo durante esse estágio (Figura 6). Essa fase tem potencial para emitir  $\text{CH}_4$  na mesma proporção que na fase de florescimento, o que exige cuidados com a lâmina de água na fase final do ciclo da cultura, para evitar altos efluxos de  $\text{CH}_4$  neste período.

A associação entre as taxas de emissão de  $\text{CH}_4$  e a taxa de transpiração nos dias das coletas é apresentada na Tabela 6. As taxas de efluxo de  $\text{CH}_4$  só se relacionaram com as taxas transpiratórias quando as condições eletroquímicas do solo foram favoráveis a emissão de  $\text{CH}_4$  (Tratamento IC e ISS). No tratamento de

irrigação contínua (IC), o coeficiente de correlação linear de Pearson entre a taxa transpiratória e a emissão de CH<sub>4</sub> foi de 0,88. Segundo Nouchi; Mariko; Aoki (1990), esta associação ainda não é clara, pois em seu trabalho, a abertura dos estômatos não foi relacionada com taxas de emissão de CH<sub>4</sub>. No entanto, Groot et al. (2005) encontrou relações positivas entre o efluxo e a taxa transpiratória das plantas. A alta taxa fotossintética aumenta o metabolismo da planta, aumentando a liberação de exudatos radiculares, que pode estar afetando diretamente na emissão de CH<sub>4</sub>, pois a liberação de carbono via exsudação é a fonte de carbono para a metanogênese, contribuindo para a efluxos de CH<sub>4</sub> (Figura 6).

Tabela 6 - Taxas de transpiração das plantas de arroz nos dias de coleta de CH<sub>4</sub> e coeficiente de correlação de Pearson com as taxas de emissão de CH<sub>4</sub> no experimento na casa de vegetação.

	IC	ISS	ISC	SSC	CC
Datas das	----- ml dia <sup>-1</sup> vaso <sup>-1</sup> -----				
24/10/2009	79 (0,0) <sup>1</sup>	71 (0,0)	65 (0,0)	60 (0,0)	59 (0,0)
28/10/2009	233(0,0)	151 (0,0)	135 (0,0)	121 (0,0)	126 (0,0)
04/11/2009	103 (0,0)	96 (0,1)	85 (0,2)	93 (0,0)	98 (0,0)
11/11/2010	289 (0,1)	294 (0,1)	255 (0,1)	256 (0,0)	269 (0,0)
18/11/2009	179 (0,9)	195 (0,8)	160 (0,0)	167 (0,0)	120 (0,0)
25/11/2010	503 (1,6)	466 (1,4)	431 (0,0)	402 (0,0)	511 (0,0)
02/12/2009	416 (3,9)	524 (2,8)	428 (0,0)	382 (0,0)	224 (0,0)
09/12/2009	856 (3,7)	885 (2,0)	963 (0,0)	640 (0,0)	559 (0,0)
17/12/2009	1358 (6,0)	3161 (2,8)	1089 (0,0)	807 (0,0)	583 (0,0)
23/12/2009	1643 (10,7)	1633 (3,9)	1654 (0,0)	1401 (0,0)	876 (0,0)
30/12/2009	1740 (15,5)	2009 (7,1)	1481 (0,0)	1405 (0,0)	1089 (0,0)
07/01/2010	1099 (7,5)	1394 (6,2)	951 (0,0)	817 (0,0)	796 (0,0)
15/01/2010	600 (10,2)	521 (2,5)	1394 (0,0)	823 (0,0)	408 (0,0)
29/01/2010	1288 (12,2)	1195 (4,1)	1115 (0,0)	968 (0,0)	638 (0,0)
Pearson	0,88	0,68	0,20	-0,28	-0,22

<sup>1</sup> Valores entre parênteses representam as taxas de efluxo de CH<sub>4</sub> nas datas de coleta expressos em mg m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>; IC – Irrigação contínua; ISS – Irrigação intermitente com realagamento do solo ainda saturado com água; ISC – Irrigação intermitente com realagamento do solo na capacidade de campo; SSC - Irrigação com solo saturado e reinício da irrigação com o solo inferior a capacidade de campo e CC - Irrigação com adição de água diária para manutenção na capacidade de campo.

A presença de microporos na região abaxial são indicativos propostos por Nouchi; Mariko e Aoki (1990) para escape do CH<sub>4</sub> produzido no solo alcançar a atmosfera. A maior relação entre a emissão de CH<sub>4</sub> e taxa transpiratória ocorreu no tratamento IC ( $r^2=0,88$ ) e o tratamento ISS ( $r^2=0,68$ ). Na medida em que os tratamentos com alagamento intermitente permitam a oxidação do solo durante o ciclo da cultura, esta relação diminui (Tabela 6). Nos tratamentos ISC, SSC e SC, as

condições do solo devem promover a inibição da metanogênese ou a oxidação aeróbica do carbono do  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$ , não apresentando correlações significativas entre as variáveis (Tabela 6).

Nas coletas de gases não ocorreu picos intensos de  $\text{N}_2\text{O}$  no cultivo do arroz irrigado independente dos tratamentos de manejo de irrigação adotados (Figura 9). Isso indica que a coleta de  $\text{CH}_4$  em datas pré-determinadas não favoreceu a detecção da liberação de  $\text{N}_2\text{O}$  nestes tratamentos. Isso porque os intervalos utilizados para avaliação (7 ou 15 dias) não devem ser adequados para avaliar com precisão os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$ , cuja dinâmica e condições de produção é bastante distinta do  $\text{CH}_4$ .

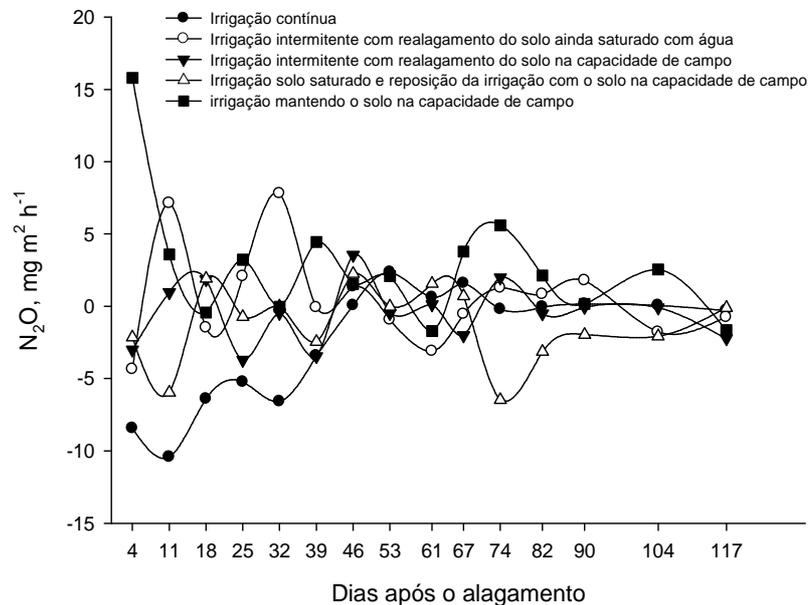


Figura 9 - Taxas de efluxo de  $\text{N}_2\text{O}$  no experimento em casa de vegetação em função do manejo de irrigação no arroz.

Embora com o presente experimento não se detectasse picos significativos de emissão de  $\text{N}_2\text{O}$ , ainda são necessários outros estudos para avaliar o impacto da irrigação intermitente sobre a emissão de  $\text{N}_2\text{O}$ . Segundo Minamikawa e Sakai (2005), a manutenção de valores de Eh entre 0 e 200 mV pode ser o limite entre um sistema que diminui a emissão de  $\text{CH}_4$  e ao mesmo tempo, o sistema é intensamente reduzido a ponto de não ocorrer a nitrificação do  $\text{NH}_4^+$ , sendo portanto mitigador da emissão de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ . Hou et al. (2000) também indicam valores de Eh entre -100 mV até 200 mV como estratégia de mitigação na emissão de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ . Este intervalo de Eh pode ser importante para se estabelecer as condições

ideais de realagamento do solo visando mitigar os dois gases de efeito estufa importantes na cultura do arroz, o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{N}_2\text{O}$ .

### **3.2.4 CONCLUSÕES**

Os maiores efluxos de  $\text{CH}_4$  foram obtidos no sistema de irrigação contínua. O manejo da irrigação intermitente com o realagamento do solo ainda saturado diminuiu a emissão de  $\text{CH}_4$  em 70%, sem causar prejuízo na produtividade do arroz.

O manejo intermitente da irrigação com o realagamento do solo abaixo da capacidade de campo (completamente aerado) não teve efluxo de  $\text{CH}_4$ , porém provocou efeitos negativos sobre a produtividade do arroz.

As condições eletroquímicas do solo são determinantes para a produção de  $\text{CH}_4$  no solo, enquanto que o potencial de emissão de  $\text{CH}_4$  esta relacionado com o estágio de desenvolvimento da planta de arroz.

## 2.6 CAPITULO III

### MANEJO DA IRRIGAÇÃO E A NUTRIÇÃO DAS PLANTAS DE ARROZ

#### 3.3.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de produção de arroz no Sul do Brasil utilizam o alagamento do solo com lâmina de água contínua como forma de irrigação das lavouras (SOSBAI, 2010). Esta prática de irrigação causa a substituição do ar nos espaços porosos do solo pela água, diminuindo a disponibilidade de  $O_2$  (PONNAMPERUMA, 1972). Logo, o sistema se torna anaeróbico devido a baixa taxa de difusão do  $O_2$  na água (BHARAT et al., 2001). Nestas condições, os elétrons gerados na respiração anaeróbia de bactérias são transferidos para os compostos oxidados do solo. A sequência de reações inicia com a redução do  $NO_3^-$ , seguido por  $MnO_2$ ,  $Fe(OH)_3$  e  $SO_4^{2-}$  (PONNAMPERUMA, 1972). A consequência da redução do solo é o aumento da concentração de  $Fe^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  devido à maior solubilidade nessas condições, de cátions como  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  por deslocamento da CTC, e do P em solução pelo rompimento das ligações específicas com os óxidos de Fe e Al (OHLSSON, 1979).

Alternativas ao alagamento contínuo na irrigação do arroz surgem a partir da necessidade diminuir o uso da água de irrigação, conservar os recursos hídricos, diminuir a toxidez por  $Fe^{+2}$  e ácidos orgânicos no arroz e diminuir as emissões de gases de efeito estufa (BOUMAN; LAMPAYAM; TUONG, 2007). A irrigação por alagamento com lâmina de água intermitente é um manejo de irrigação alternativo à irrigação por alagamento contínuo (BOUMAN; LAMPAYAM; TUONG, 2007). Neste manejo, o solo é alagado como na irrigação contínua, mas a diferença consiste na não manutenção da lâmina de água no solo, permitindo diminuir até tornar-se ausente, momento no qual é realizado um novo ciclo de alagamento (BOUMAN, 2001). Porém, a irrigação contínua é utilizada por apresentar vantagens no processo de produção do arroz (SILVA et al., 2008); no entanto, sistemas de manejo alternativo a irrigação contínua podem alterar a dinâmica dos nutrientes em função das alterações estabelecidas pelas reações de oxidação e redução dos solos. Como

conseqüência, pode alterar a disponibilidade e absorção de nutrientes, afetar a fisiologia das plantas e, como conseqüência, a produtividade de arroz.

O sistema de irrigação intermitente deve permitir o aumento do Eh do solo, para oxidar os compostos inorgânicos e diminuir a toxidez por  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e ácidos orgânicos (BOUMAN, 2001). No entanto, esses sistemas alternativos de irrigação não produzem somente efeitos benéficos para o crescimento e desenvolvimento da planta, podendo afetar a disponibilidade de nutrientes (LIMA et al., 2002. MINAMIKAVA; SAKAI, 2005, JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009; TYAGI; KUMARI; SINGH, 2010). A avaliação dos efeitos do alagamento do solo sobre as condições eletroquímicas da solução e, conseqüentemente, sobre as plantas de arroz, é fundamental para estabelecer um manejo de irrigação que permita economia de água sem proporcionar efeitos negativos ao desenvolvimento das plantas, não afetando assim a produtividade da cultura.

O objetivo deste capítulo é avaliar os sistemas de manejos de irrigação na cultura do arroz e os efeitos nos atributos eletroquímicos da solução do solo e no desenvolvimento das plantas.

### 3.3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS. O solo utilizado foi um Planossolo Háplico eutrófico típico (Embrapa, 2006) coletado no campo experimental do Departamento de Solos da UFSM. O solo foi coletado na camada de 0-10 cm, seco ao ar, peneirados em malha de 2 mm e apresentava as seguintes características químicas: valor de pH de 4,2; concentração de Ca de  $1,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ;  $0,26 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de Mg;  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  de P;  $40 \text{ mg kg}^{-1}$  de K e  $35 \text{ g kg}^{-1}$  de C. O solo foi acondicionado em vasos com  $7 \text{ kg}^{-1}$  de solo com 4 repetições em delineamento inteiramente casualizado. Na ocasião da instalação do experimento foram adicionados ao solo  $\text{CaCO}_3$  para elevar o pH a 5,5 (CQFS, 2004), macronutrientes P e K ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo) e micronutrientes Cu, Zn, B, S nas doses de 1,5, 2,5, 1,5,  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo respectivamente, todos na forma de reagentes PA. O N foi aplicado na forma de  $\text{NH}_4^+$  na dose de  $105 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo. Os coletores de solução

do solo foram instalados a 10 cm de profundidade, formados por canos de PVC de 15 cm de comprimento, 2,5 cm de diâmetro, perfurados e recobertos com tela de poliamida com poros de 80  $\mu\text{m}$ . Estes eram conectados a uma mangueira de PVC de 3 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento que atingia a parte externa do vaso (Apêndice 3).

Os tratamentos realizados foram: I) irrigação contínua com 5 cm de lâmina de água (IC); II) irrigação intermitente com 5 cm de lâmina de água e reinício do alagamento com o solo saturado (ISS); III) irrigação intermitente com 5 cm de lâmina água com reinício do alagamento com o solo na umidade inferior a capacidade de campo (ISC); IV) irrigação com solo saturado e adição de água no solo inferior a capacidade de campo (SSC); e V) irrigação com adição de água diária para manutenção na capacidade de campo (CC).

A determinação da capacidade de campo e a saturação do solo foram determinadas segundo a metodologia descrita em EMBRAPA (1997). O plantio foi realizado em 17/10/2009, com o transplante de 12 plântulas da cultivar Avaxi CL. O desbaste ocorreu no quarto dias após o transplante permanecendo 6 plântulas por vaso, sendo então aplicado os tratamentos. O controle da irrigação foi realizado por meio de pesagens dos vasos diariamente com adição de água destilada quando atingido o peso de realagamento de cada tratamento (capítulo II). A coleta da solução do solo foi realizada com o auxílio de uma seringa plástica com capacidade de 60 mL conectada a um sistema conforme descrito no capítulo II. Em função da baixa disponibilidade de água nos tratamentos 4 (SSC) e 5 (CC) não obteve coleta da solução do solo, não sendo apresentados estes resultados. O pH e Eh foram mensurados imediatamente após a coleta da solução utilizando potenciômetro de eletrodo combinado portátil e potenciômetro com eletrodo Ag/AgCl com anel de platina, respectivamente. A conversão desses valores para Eh, equivalente em potencial de hidrogênio, foi obtido somando 220 mV às leituras.

A solução do solo foi filtrada com filtro Whatman nº 42, adicionado 1 mL de HCl 2 mol L<sup>-1</sup> e estocados em geladeira. O teor de carbono dissolvido foi determinado conforme descrito por Silva et al. (2001) por espectrômetro de UV-vísivel a 580 nm. Os teores de Ca, Mg, Fe, Mn e P foram realizados segundo a metodologia descrita em Tedesco et al. (1995) por espectrômetro de absorção atômica, exceto P, determinado por Murphy e Riley (1962).

A coleta do experimento ocorreu aos 131<sup>o</sup> dias após o alagamento (DAA). Foi avaliada a matéria verde, matéria seca em estufa de ar forçada a 65°C durante 48 horas e matéria seca de grãos. A matéria seca da parte aérea foi moída em moinho tipo “Wiley”, e posteriormente submetida digestão sulfúrica e determinado os teores totais de N, Ca, Mg, P e K segundo a metodologia descrita em Tedesco et al. (1995). A eficiência do uso da água (EUA) foi calculada utilizando o valor do consumo total de água em cada tratamento pela sua respectiva produtividade.

Os resultados de produtividade de grãos e de matéria seca da parte aérea foram submetidos à análise de variância e, quando os efeitos foram significativos, foram comparados pelo teste de Tukey com nível de significância de 5 %. Os valores de pH, Eh, teores de C, Fe, Mn, Ca, Mg e K foram apresentados graficamente com o desvio padrão obtido em cada coleta.

### **3.3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **Alterações eletroquímicas na solução do solo**

Na primeira coleta da solução do solo os vasos haviam permanecido durante oito dias com o solo completamente saturado com água (Figura 10). Nos quatro primeiros dias o solo estava saturado em função do plantio das plântulas e, após o transplante, permaneceu mais quatro dias alagado em função da irrigação, até a realização da primeira coleta. Aos 11 DAA os valores de pH do solo aumentaram em relação a primeira coleta, enquanto que os valores de Eh do solo diminuíram, em todos os tratamentos (Figura 10a e 10b). Alterações de pH e do Eh ocorrem de maneira inversa em solos alagados, enquanto pH aumenta devido ao decréscimo da atividade de H<sup>+</sup>, o Eh diminui, que é uma medida do grau de oxidação dos solos (PONNANPERUMA, 1972). No tratamento de irrigação contínua (IC), os valores de pH e Eh da solução do solo atingiram valores máximos e mínimos, respectivamente, aos 25 dias após o alagamento, permanecendo constante durante o todo o experimento (Figuras 10a e 10b). Este manejo de irrigação é o tradicionalmente utilizado no cultivo de arroz do RS e SC (SOSBAI, 2010). Assim, as condições de anaerobiose proporcionadas por este manejo de irrigação demonstram que este sistema apresenta alta capacidade em manter o solo reduzido, possibilitando

expressar em determinados tipos de solos os efeitos negativos do cultivo em ambiente anaeróbico as plantas, como a toxidez de  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mn}^{+2}$ , toxidez por ácidos orgânicos (BORTOLON; SOUSA; OLIVEIRA, 2009), como também a emissão de gases de efeito estufa como o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{N}_2\text{O}$  (TYAGI; KUMARI; SING, 2010; LIU et al., 2010; SILVA et al., 2011).

Uma alteração no manejo da irrigação do solo, visando a oxidação dos compostos reduzidos, é facilmente mensurada pela medida do valor do pH e Eh (ESSINGTON, 2005). Assim, os tratamentos de irrigação intermitente com o realagamento do solo ainda saturado (ISS) e tratamento irrigação intermitente com o realagamento com o solo abaixo da capacidade de campo (ISC) causaram oscilações nos valores de pH e Eh, diminuindo a intensidade de redução do solo com o decorrer do cultivo (Figura 10a e 10b). Essa diminuição na redução do solo iniciou aos 11 DAA (Figuras 10a e 10b). Nesta data, o conteúdo de água no solo estava inferior capacidade de campo nestes tratamentos, permitindo a entrada de oxigênio nos macroporos do solo, finalizando as reações de redução do solo. Segundo Ponnampertuma (1972), a respiração aeróbica ocorre em concentrações de oxigênio de até  $3 \cdot 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$  e, como o oxigênio é o oxidante mais forte presente no meio, as reações de redução são imediatamente interrompidas pela presença de  $\text{O}_2$ . Assim, os valores de pH diminuíram e os de Eh aumentaram. A rapidez com que as reações de oxidação do solo ocorrem no experimento foi devido ao cultivo em vasos, facilitando a entrada de  $\text{O}_2$  no sistema, interrompendo as reações de redução do solo (Figura 10).

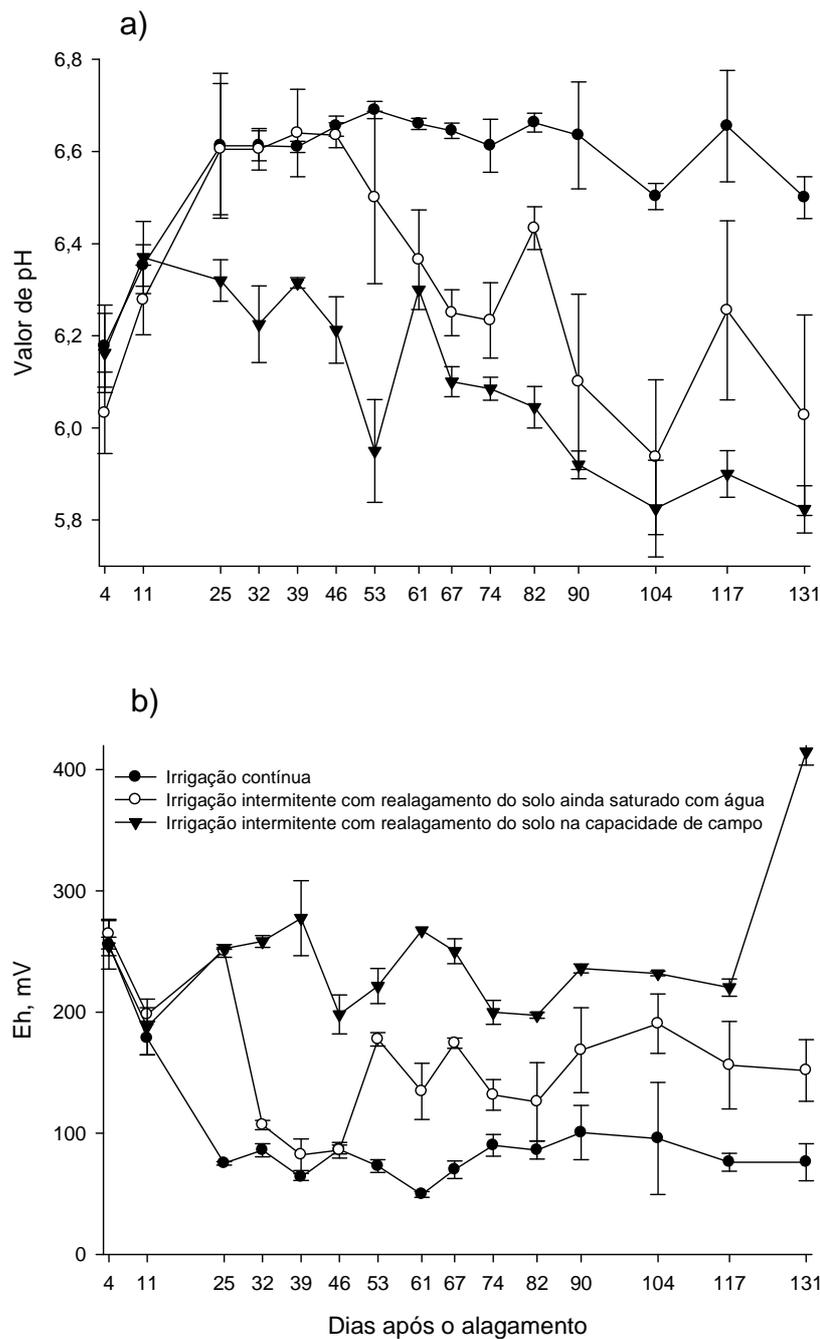


Figura 10 - Valores de pH (a) e Eh (b) da solução do solo em função do manejo de irrigação durante o ciclo da cultura do arroz cultivado em casa de vegetação.

O tratamento irrigação intermitente com o realagamento do solo na capacidade de campo (ISC) foi eficiente em diminuir a redução do solo (Figura 10b). Isso ocorre devido a ausência da lâmina de água sobre a superfície do solo e a diminuição do conteúdo de água até a eliminação da água presente nos macroporos, responsáveis pela entrada de oxigênio no sistema e reoxidação dos

compostos reduzidos do solo (Figura 10). O ponto negativo neste caso é o efeito causando sobre os parâmetros produtivos da cultura (Capítulo II), como também é relatado por Bouman e Tuong (2001).

No tratamento irrigação intermitente com o realagamento com o solo ainda saturado (ISS), os valores de Eh e pH do solo foram intermediários entre o tratamento IC e ISC. O tratamento ISS permitiu uma difusão parcial do oxigênio no solo, evitando que a redução do solo atinja valores máximos como no tratamento IC (Figuras 10a e 10b). A eliminação da lâmina de água da superfície do solo permite que a camada superficial do solo seja oxidada, gerando alto gradiente de concentração entre as espécies oxidadas e reduzidas, aumentando a difusão e oxidação das espécies, permitindo aumentar a difusão de oxigênio no solo e, ao mesmo tempo, oxidar os compostos anteriormente reduzidos. Aos 25 DAA ocorreu o 1º realagamento no tratamento ISS. Nesta coleta os valores de Eh foram semelhantes ao IC, porém, um novo realagamento ocorreu aos 39 DAA e aos 45 DAA, sendo que nestas coletas não houve diferença entre os valores de pH e Eh, sendo afetadas apenas aos 53 DAA.

Após os 45 DAA, os ciclos entre os alagamentos foram curtos sendo que aos 48 DAA e 51 DAA houve ausência de lâmina de água no tratamento ISS. A frequência em que o solo permanece com a ausência de lâmina de água favorece a difusão de  $O_2$  neste tratamento, modificando o comportamento do pH e Eh em relação ao tratamento IC. A maior difusão do  $O_2$  no solo pela ausência da lâmina de água aumenta a oxidação do solo, mantendo a valores altos de Eh do solo. Peters e Conrad (1996), em valores de Eh de + 70 mV encontraram todos os íons inorgânicos aceptores de elétrons completamente reduzidos. No presente experimento, o tratamento ISS os valores de Eh oscilaram entre +100 mV e +250 mV (Figuras 10a e 10b), sendo que após 53º DAA os valores de Eh foram acima de +100 mV, o que influenciou na diminuição dos efluxos de  $CH_4$  em relação ao tratamento IC (Capítulo 2).

Na primeira coleta da solução do solo os teores de íons  $Fe^{+2}$  e  $Mn^{+2}$  na solução do solo aumentaram em relação ao solo natural, antes do alagamento (Figuras 10a e 10b). As reações de redução do solo foram mais intensas nos tratamentos IC e ISS (Figuras 10a e 10b). Como consequência, a disponibilidade dos íons  $Fe^{+2}$  e  $Mn^{+2}$  aumentaram nestes tratamentos (Figuras 11a e 11b). A máxima disponibilidade destes íons ocorreram aos 25 dias após o alagamento, que

coincidiu com os valores mínimos do Eh da solução do solo (Figura 10a e 10b). No tratamento ISC, o solo encontrava-se na capacidade de campo nesta data, o que permitiu a entrada de oxigênio no sistema, causando a re-oxidação dos íons  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mn}^{+2}$ , diminuindo a disponibilidade destes no solo (Figuras 11a e 11b). Após este período, os ciclos de alagamento ocorreram em tempos menores e as reações de redução do solo não se intensificaram, diminuindo a disponibilidade destes íons até o final do cultivo. O tratamento ISS teve uma alta disponibilidade destes íons até 39 DAA, diminuindo os teores de  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mn}^{+2}$  após este período (Figura 11a e 11b).

O  $\text{Mn}^{+4}$  antecede o  $\text{Fe}^{+3}$  na escada de oxi-redução (ESSINGTON, 2005), o que indica maior tendência do primeiro a aceitar ou doar elétrons quando oxidado e reduzido, respectivamente (PONNAMPERUMA, 1972). Assim, as formas oxidadas e reduzidas de Mn são mais influenciadas pela entrada de  $\text{O}_2$  no meio, enquanto as formas Fe permanecem mais estáveis. O manejo da irrigação com o realagamento inferior a capacidade de campo (ISC) causou uma diferença na curva de disponibilidade de  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mn}^{+2}$  (Figura 11a e 11b). A disponibilidade de  $\text{Fe}^{2+}$  tendeu a diminuir os teores após o 18º e 39º DAA para o tratamento ISC e ISS, enquanto que os teores de  $\text{Mn}^{2+}$  no solo diminuíram após os 11º 25º DAA para o tratamento ISC e ISS respectivamente.

Na escala de redução do solo, a concentração de  $\text{Mn}^{2+}$  foi mais influenciada pelo manejo da irrigação que o  $\text{Fe}^{2+}$ . Os efeitos da redução também podem ser observados em outros cátions, tais como o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$  (Figuras 12a e 12b). O aumento da disponibilidade dos íons  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{3+}$  alteram a força iônica da solução do solo, deslocando outros cátions da CTC do solo. No tratamento IC foi verificado o crescente aumento na concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na solução até o 52º DAA, coincidindo a concentração máxima de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na solução do solo. Além disso, pode-se inferir que a quantidade de  $\text{Fe}^{3+}$  reduzido é maior que a quantificada na solução, pois o  $\text{Fe}^{2+}$  que ocupa a CTC do solo e desloca outros cátions, como o  $\text{Ca}^{2+}$ , não é extraído com a solução do solo. O comportamento do  $\text{Mg}^{2+}$  ao longo do tempo em função dos tratamentos foi muito semelhante ao do  $\text{Ca}^{2+}$  (Figura 13b).

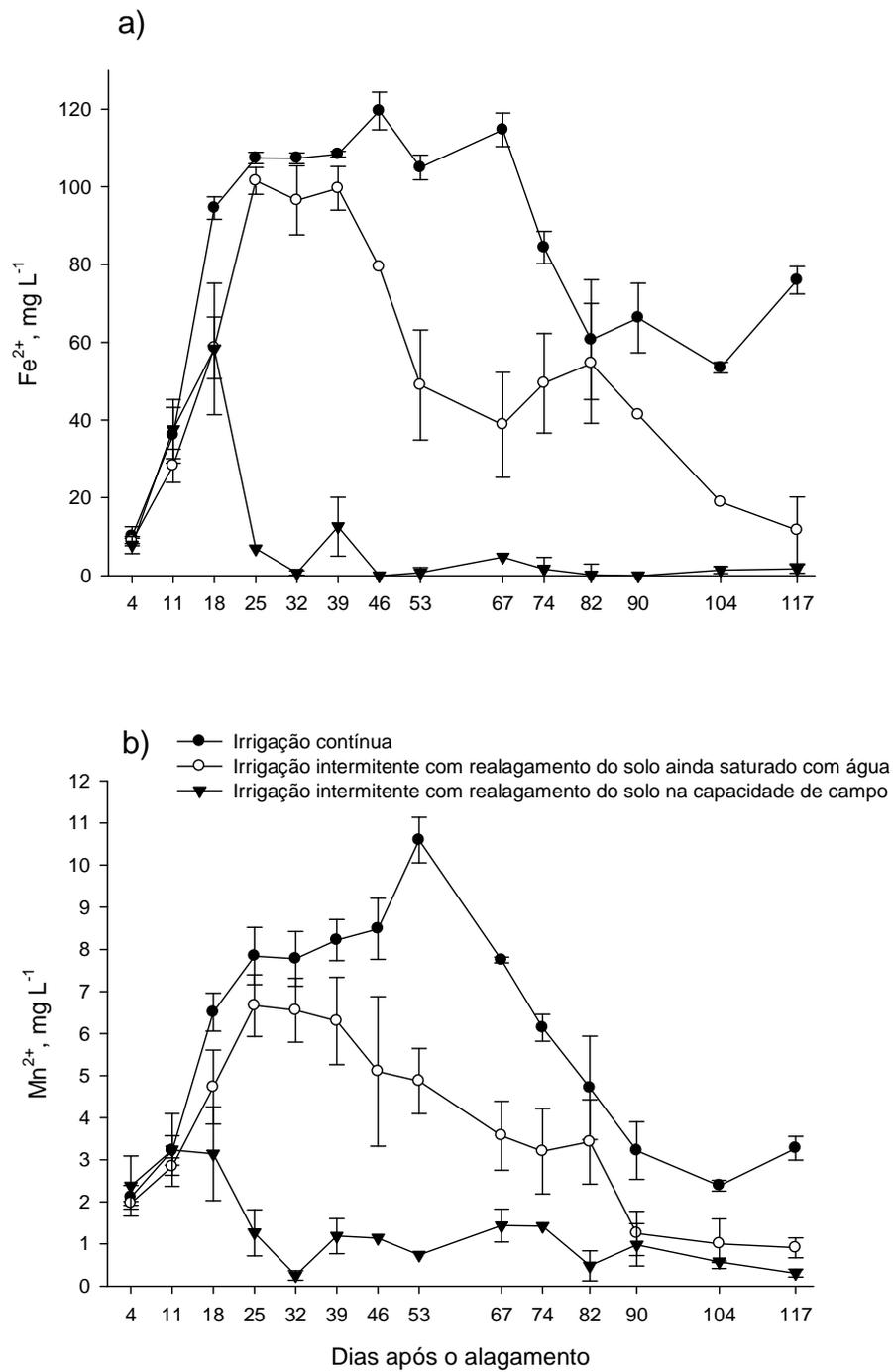


Figura 11 - Teores de Fe<sup>2+</sup> (a) e Mn<sup>2+</sup> (b) da solução do solo em função do manejo de irrigação durante o ciclo da cultura de arroz cultivado em casa de vegetação.

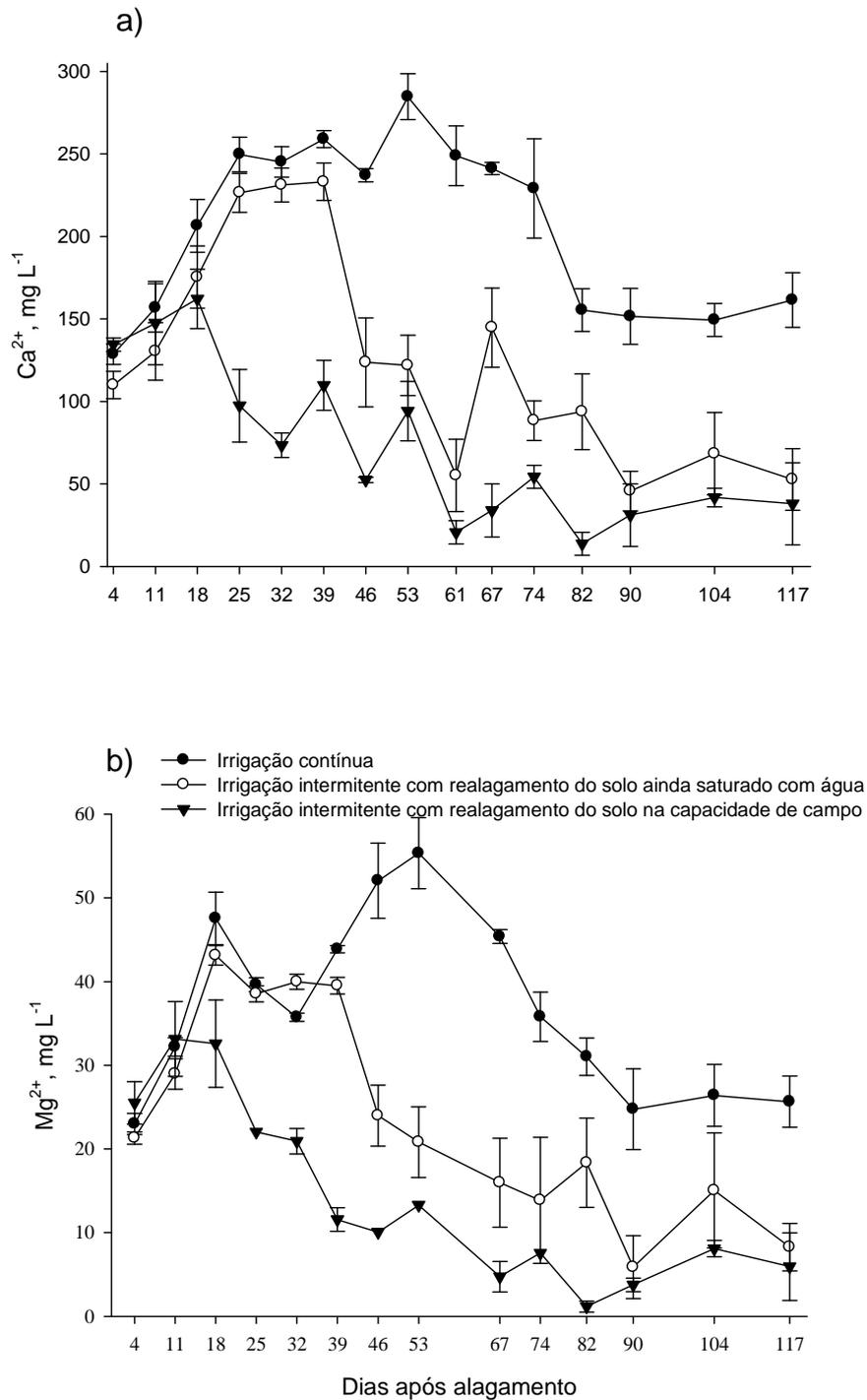


Figura 12 - Teores de  $\text{Ca}^{2+}$  (a) e  $\text{Mg}^{2+}$  (b) da solução do solo em função do manejo de irrigação do arroz cultivado em casa de vegetação.

A decomposição da matéria orgânica do solo em ambiente anaeróbico é diferente do que nas condições aeradas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). O alagamento do solo irá criar condições anaeróbicas, afetando significativamente nas concentrações de carbono no solo (Figura 13). Os teores de carbono na solução do

solo aumentaram a partir do alagamento no tratamento IC, atingindo a concentração máxima aos 61 DAA. Os valores máximos foram de  $140 \text{ mg L}^{-1}$ , diminuindo estes valores a  $28,8 \text{ mg L}^{-1}$  ao final dos cultivos (Figura 13). Esse comportamento do carbono solúvel no solo também foi encontrado por Bharati et al. (2001). Segundo o autor, o primeiro pico de efluxo de  $\text{CH}_4$  esta relacionado com a mineralização do carbono solúvel na água decorrente da mineralização da matéria orgânica nativa do solo. O segundo pico, que ocorre geralmente na fase de florescimento, ocorre devido ao carbono da metanogênese vir da planta, e não do solo. No tratamento ISS os teores de carbono na solução do solo oscilaram entre  $80 \text{ mg L}^{-1}$  até valores de  $40 \text{ mg L}^{-1}$ . Essa oscilação é em decorrência dos ciclos de alagamento que foram submetidos a este tratamento. Nas coletas realizadas aos 18, 46, 61, 82, 90 e 117 DAA, os solos foram realagados em no máximo dois dias antes da coleta da solução do solo, o que causou menor a disponibilidade de carbono nestas coletas, diminuindo a quantidade de carbono lábil para a metanogênese, diminuindo o efluxo de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera (Figura 13).

No tratamento ISC, a coleta da solução do solo aos 25, 32, 39, 46, 82 e 117 DAA também foram posteriores ao realagamento do solo, o que causou a diminuição ainda maior nos valores de carbono na solução do solo (Figura 13). Essas datas coincidem com altos valores de Eh do solo (mais positivo) em ambos os tratamentos ISS e ISC (Figura 10). A alta disponibilidade de carbono no tratamento IC durante todo o experimento é um fator que aumenta a intensidade de redução do solo e conseqüentemente influencia nos efluxos de  $\text{CH}_4$  (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009). O tratamento ISS teve uma baixa quantidade de carbono quando comparado ao tratamento IC, o que pode ter contribuído pela menor intensidade de redução do solo. Isto indica que paralelamente ao Eh do solo, a disponibilidade de carbono tem efeito importante na redução do solo, aumentando a disponibilidade de carbono, permitindo aumentar os efluxos de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera (BHARATI et al., 2001; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009)

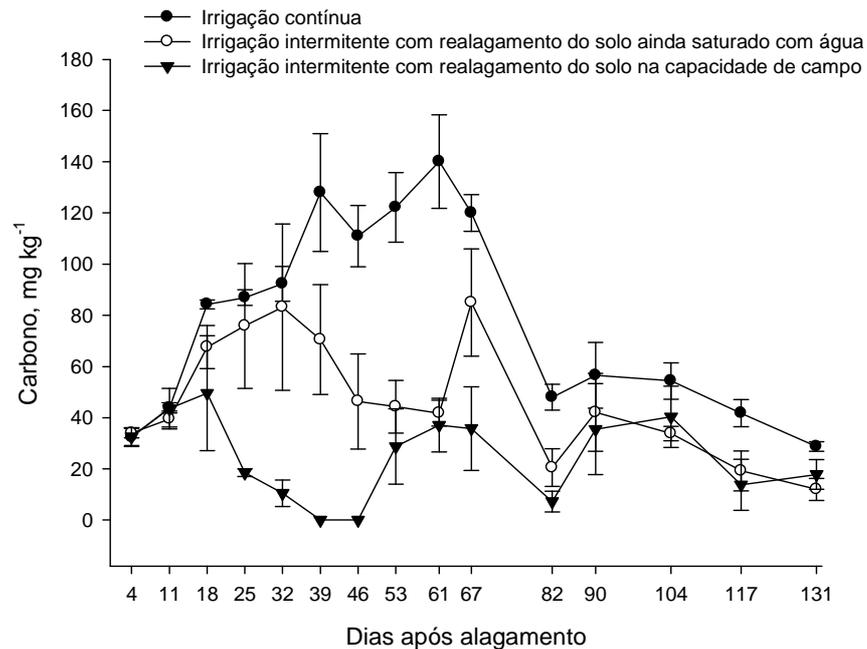


Figura 13 - Teores de carbono da solução do solo no cultivo do arroz submetido a diferentes manejos de irrigação.

### Alterações na produção de matéria seca e absorção de nutrientes pelo arroz

Aspectos agronômicos do arroz sob os diferentes manejos de irrigação demonstram diferenças significativas para a produção de matéria seca acumulada e a altura de plantas (Tabela 7). A produção de matéria seca do arroz foi máxima nos tratamentos IC e ISS, não diferindo entre elas. Por outro lado, no tratamento ISC a produção de matéria seca de arroz foi inferior, sendo que a menor produção ocorreu nos tratamentos com irrigação sem lâmina de água, SSC e CC (Tabela 7). O manejo intermitente da irrigação nestes tratamentos apresentou um atraso no ciclo da cultura comparado ao tratamento irrigação contínua (IC), que teve seu florescimento antecipado em cinco dias em relação aos demais tratamentos. O último tratamento a florescer foi o tratamento CC, que floresceu 14 dias após o florescimento do tratamento IC. Por ocasião da coleta do arroz algumas panículas não ocorreram a formação de grãos, pelo o aborto de espiguetas em função do déficit hídrico ou devido altas temperaturas ocorridas no período de florescimento da cultura.

Tabela 7 - Características agrônômicas do arroz cultivado em casa de vegetação e submetido a diferentes manejos de irrigação.

Tratamentos	MS da parte aérea	Perfihos	Altura de plantas	EUA
	g vaso <sup>-1</sup>	nº	cm	kg m <sup>-3</sup>
IC	210,5 a	11,5	86,3 a	0,73 b
ISS	216,1 a	9,8	85,3 a	0,95 a
ISC	173,0 b	9,8	76,7 a	0,67 b
SSC	145,0 c	11,2	79,5 a	0,41 c
CC	130,1 c	10,6	70,5 b	0,16 d
Coeficiente de	7,0	ns	10,5	16,0

<sup>EUA</sup> Eficiência do uso da água; <sup>ns</sup> não significativo ao nível de 5 % de probabilidade; Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (P>0,05). IC – Irrigação contínua; ISS – Irrigação intermitente com realagamento do solo ainda saturado com água; ISC – Irrigação intermitente com realagamento do solo na capacidade de campo; SSC - Irrigação com solo saturado e reinício da irrigação com o solo inferior a capacidade de campo e CC - Irrigação com adição de água diária para manutenção na capacidade de campo.

O tratamento ISS e IC obtiveram as maiores produções de matéria seca da parte aérea de arroz, indicando que nestes sistemas de irrigação se obtêm as maiores produtividades (Tabela 7). Mezzomo (2009), em condições de campo, não encontrou diferenças na produtividade do arroz utilizando irrigação contínua e intermitente, com o realagamento com o solo saturado a qual ainda apresentou a vantagem de economia de água. Khosa et al. (2011) também não obtiveram diferença da produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos desde que o realagamento da irrigação intermitente seja realizado com potencial de água no solo inferior a 1 kpa, corroborando com os dados de Bouman e Tuong (2001).

O número de perfilhos não foi afetado pelo manejo de irrigação (Tabela 7), no entanto, a altura média das plantas diferiu significativamente, sendo que apenas no tratamento CC as plantas apresentaram menor estatura, diminuição da matéria seca e consecutivamente diminuição da produção de grãos, comparado com os outros tratamentos (Tabela 7). Ao realizar o cálculo da eficiência do uso da água (EUA) verificou-se que o tratamento ISS apresentou a maior eficiência (0,95 kg de arroz por m<sup>3</sup> de água consumida), seguido dos tratamentos IC e ISC. Os demais tratamentos apresentaram valores inferiores a 0,5 kg de arroz por m<sup>3</sup> de água consumida (Tabela 7). Mezzomo (2009) encontrou índices de eficiência para a irrigação intermitente de 1,68 kg de arroz por m<sup>3</sup> de água consumida e de 1,14 kg de arroz por m<sup>3</sup> de água consumida para a irrigação contínua. Bouman; Lampayam e Tuong (2007) encontraram valores de eficiência no uso da água de 0,3 kg de arroz por m<sup>3</sup> para

irrigação por alagamento contínuo e de 0,6 kg de arroz por m<sup>3</sup> consumido de água para a irrigação intermitente.

A eficiência do uso da água no experimento aumentou em 25% utilizando a irrigação intermitente com o realagamento com o solo saturado comparado ao tratamento IC, dados estes inferiores aos encontrados nos experimentos a campo por Mezzomo (2009). Deve-se considerar, no entanto que os efeitos desse sistema permitiram, além do aumento na produção de matéria seca, a maior eficiência do uso da água, atingindo os objetivos do manejo intermitente da irrigação em diminuir o consumo de água e manter altas produtividades do arroz (BOUMAN, 2001).

A concentração de nutrientes na matéria seca das plantas não apresentou diferenças significativas, exceto para o nitrogênio (Tabela 8). O tratamento com IC apresentou os maiores teores de N total no tecido (Tabela 8). Embora os teores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> na solução do solo não tenham sido quantificados, em ambientes anóxicos o N mineralizado é acumulado na forma NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, porém os ciclos de alagamento e aeração do solo permitem a nitrificação, oxidando o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> até NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Posteriormente o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se torna indisponíveis à absorção radicular, reduzido por desnitrificação até formas gasosas, como N<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub>, as quais são volatilizadas e (HOU et al., 2000). Desta maneira, o alagamento contínuo do solo possivelmente tenha evitado a nitrificação do NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, mantendo maiores os teores de N no solo, possibilitando assim que as plantas absorvessem maiores quantidades de nitrogênio neste tratamento (Tabela 8).

Tabela 8 - Concentração e quantidade acumulada de nutrientes na matéria seca do arroz submetido a diferentes manejos de irrigação.

Trat.	Concentração de nutrientes					Quantidade acumulada				
	N	Ca	Mg	P	K	N	Ca	Mg	P	K
	----- g kg <sup>-1</sup> -----					----- g vaso <sup>-1</sup> -----				
IC	23a	1,04	0,65	0,84	8,6	4,8a	0,22a	0,14a	0,17a	1,9ab
ISS	13b	0,82	0,70	1,04	8,7	2,9b	0,18ab	0,16a	0,23ab	1,8a
ISC	11bc	1,06	0,73	1,03	8,4	1,8c	0,18ab	0,13ab	0,18ab	1,4b
SSC	10c	0,94	0,55	1,05	6,5	1,5c	0,14b	0,08b	0,15b	0,9c
CC	10c	0,93	0,60	0,99	7,0	1,2c	0,12b	0,08b	0,13b	0,9c
CV	9,0	ns	ns	ns	ns	14,2	19,1	20,2	14,7	13,4

Valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> não significativo; CV - coeficiente de variação; IC – Irrigação contínua; ISS – Irrigação intermitente com realagamento do solo ainda saturado com água; ISC – Irrigação intermitente com realagamento do solo na capacidade de campo; SSC - Irrigação com solo saturado e reinício da irrigação com o solo inferior a capacidade de campo e CC - Irrigação com adição de água diária para manutenção na capacidade de campo.

Os reflexos negativos da intermitência da irrigação podem ocorrer, principalmente pela maior necessidade das adubações nitrogenadas para compensar as perdas e os riscos de maior efluxo de  $N_2O$ , que também é de efeito estufa com alto potencial de aquecimento global. O controle da irrigação deve ser rigoroso para evitar riscos de todo o sistema se comprometer, e aumentar as perdas de  $N_2O$  e a diminuição da produtividade da cultura. A quantidade acumulada de nutrientes na matéria seca foi diferente em função das diferenças na produção de matéria seca ocorrida nos tratamentos (Tabela 8), com exceção do nitrogênio, já que para os demais nutrientes não houve diferença significativas nos teores do tecido. A alta quantidade de nitrogênio acumulada indica que o principal efeito dos manejos de irrigação sobre o arroz é na disponibilidade de nitrogênio, podendo ser um componente que afetou a produtividade do arroz (Tabela 7). O efeito do manejo de irrigação sobre o efluxo de  $N_2O$  tem demonstrado que aumentam os efluxos de  $N_2O$  com este manejo (HOU et al., 2000; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009; TYAGI; KUMARI; SINGH, 2010). No presente trabalho não foi verificado o efluxo de  $N_2O$  em função do manejo de irrigação (Capítulo II).

### 3.3.4 CONCLUSÕES

O sistema de irrigação contínua proporcionou a máxima disponibilidade de cátions ( $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$  e  $Mn^{+2}$ ) e carbono na solução do solo.

O sistema de irrigação intermitente com realagamento do solo ainda saturado manteve os atributos eletroquímicos da solução do solo (Eh, pH,  $Fe^{2+}$  e  $Mn^{2+}$ ) com valores intermediários entre a irrigação intermitente com realagamento do solo na capacidade de campo e a irrigação contínua.

Os sistemas de irrigação afetaram a produção de matéria seca do arroz sendo que a irrigação contínua e o intermitente com o realagamento do solo ainda saturado proporcionaram as maiores produções de matéria seca das plantas.

O nitrogênio foi o nutriente mais afetado pelo manejo da irrigação.

## **3 ESTUDO II**

# **FATORES MORFOFISIOLÓGICOS QUE AFETAM O EFLUXO DE METANO EM CULTIVARES DE ARROZ IRRIGADO POR ALAGAMENTO**

## **4.1 CAPITULO I**

### **POTENCIAL DE EFLUXO DE CH<sub>4</sub> ASSOCIADO À CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLOGICAS DE CULTIVARES DE ARROZ IRRIGADO**

#### **4.1.1 INTRODUÇÃO**

O cultivo do arroz irrigado por alagamento é uma fonte emissora de CH<sub>4</sub> para a atmosfera, que contribui com o aquecimento global antrópico (IPCC, 2007). A planta de arroz possui adaptações para o seu cultivo em condições anaeróbicas que visam suprir a demanda das raízes em oxigênio (EVANS, 2003). Ela desenvolve espaços intercelulares que transportam O<sub>2</sub> da atmosfera para as raízes, sistema esse denominado de aerênquima. Os aerênquimas oferecem um canal de baixa resistência à difusão de gases (BUTTERBACH-BAHL; PAPEN; RENNENBERG, 1997). Embora não seja sua função primária, os aerênquimas transportam o CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> do solo até a atmosfera. Por este motivo, a planta de arroz contribui com até 90% do transporte do CH<sub>4</sub> produzido no solo até a atmosfera (BUTTERBACH-BAHL; PAPEN; RENNENBERG, 1997).

A quantificação do efluxo de CH<sub>4</sub> por diferentes cultivares de arroz demonstrou que existem diferenças entre elas quanto ao potencial de transporte (WANG; NEUE; SAMONTE, 1997a; MITRA et al., 1999; AULAKH et al., 2000; AULAKH et al., 2002; GOGOI et al., 2005; DAS; BURUAH, 2008). As diferenças no

efluxo de CH<sub>4</sub> podem ocorrer em função das características morfológicas e fisiológicas (morfofisiológicas) distintas que ocorrem no arroz, que afetam a produção de CH<sub>4</sub> no solo e o seu transporte até a atmosfera (WASMANN et al., 1998). Com o transporte menos favorecido, o CH<sub>4</sub> permanece no solo, podendo ser oxidado a CO<sub>2</sub> através de bactérias metanotróficas, reduzindo a sua contribuição para o efeito estufa antrópico, assim como as características das cultivares que desfavorecem a produção do CH<sub>4</sub> no solo.

Dentre as características que afetam o transporte de CH<sub>4</sub>, o volume de raízes foi correlacionado positivamente com o efluxo de CH<sub>4</sub> (MITRA et al., 1999). A capacidade de perfilhamento das cultivares também influencia no efluxo de CH<sub>4</sub> (MITRA et al., 1999; AULAKH et al., 2002; GOGOI et al., 2005; DAS; BARUAH, 2008). O maior perfilhamento aumenta os canais de aerênquimas, aumentando o transporte de CH<sub>4</sub> até a atmosfera. A área foliar também influencia no efluxo de CH<sub>4</sub> por aumentar a área de transporte do CH<sub>4</sub> do interior da planta para a atmosfera, via estruturas como os estômatos e microporos (NOUCHI; MARIKO; AOKI, 1990; WANG; NEUE; SAMONTE, 1997b). Assim, são encontradas correlações positivas entre o efluxo de CH<sub>4</sub> e a matéria seca da parte aérea (WANG; NEUE; SAMONTE, 1997a; MITRA et al., 1999; AULAKH et al., 2002; GOGOI et al., 2005; DAS; BARUAH, 2008). Lindau et al. (1995) encontraram que as cultivares de porte baixo tiveram um efluxo 36% menor que as cultivares de porte médio ou alto. O efluxo de CH<sub>4</sub> também apresentou correlação positiva com a taxa transpiratória (GROOT et al., 2005). Desta maneira, agregando características das cultivares que impactam em menor efluxo de CH<sub>4</sub>, pode-se mitigar o efluxo de CH<sub>4</sub> para a atmosfera pela cultura do arroz irrigado.

Diversas foram as relações encontradas entre os atributos morfofisiológicos do arroz e o efluxo de CH<sub>4</sub>. A alta diversidade de genótipos de arroz que compreendem em mais de 20 espécies do gênero *Oryza*, com mais 80.000 cultivares conhecidas, mostram uma ampla variação nos seus atributos morfofisiológicos (YOSHIDA, 1981). As cultivares de arroz interferem no efluxo de CH<sub>4</sub> devido às suas diferenças, causando variação de até 100% no efluxo de CH<sub>4</sub> entre cultivares (AULAKH et al., 2000b). Como o efluxo de CH<sub>4</sub> varia em função de suas características morfofisiológicas (WANG; NEUE; SAMONTE, 1997b; SING; SING; KASHYAP, 1998; AULAKH et al., 2000b; DAS; BARUAH, 2008), a identificação destas são importantes afim de determinar os atributos que relacionam-

se com o efluxo de CH<sub>4</sub>, podendo ser usado como estratégia para mitigar o efluxo desse gás.

Assim, necessita-se identificar nas cultivares utilizadas no RS e SC os fatores responsáveis pelo efluxo de CH<sub>4</sub>, possibilitando estabelecer grupos ou cultivares que apresentam menor potencial de efluxo de CH<sub>4</sub>. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de efluxo de CH<sub>4</sub> de cultivares de arroz do RS e SC e sua relação com os atributos morfofisiológicos.

#### **4.1.2 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado na casa de vegetação do Departamento de Solos da UFSM. O experimento constituiu do cultivo de 19 cultivares de arroz disponíveis para o cultivo comercial nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. As cultivares de arroz foram selecionadas visando abranger uma ampla variabilidade genética e de características morfofisiológicas, como ciclo, estatura das plantas, capacidade de perfilhamento e potencial produtivo. As cultivares híbridas selecionadas foram: Avaxi e Inov CL (Ricetec) e Arize QM 1003 (Bayer) e as variedades foram: BRS Querência, BRS Atalanta, BRS Taim e BRS Bojuru, Irga 422 CL, Irga 421 e Irga 424, EPAGRI 108, SCS BRS Tio Taka, SCS114 Andosan e SCS 116 Satoru e IAS Formosa, Bluebelle, Carnaroli, Koshihikari e Farroupilha. As principais características das cultivares encontram-se descritas na Tabela 9.

O experimento foi realizado em vasos com 7 kg de um Planossolo Hidromórfico típico com duas repetições. Aproximadamente 20 sementes de cada variedade foram postas para germinar e após sete dias transplantadas aos vasos, cujas dimensões foram de 25 cm de diâmetro e 25 cm de altura. Após quatro dias realizou-se o desbaste deixando apenas seis plântulas por vaso, totalizando 12 plantas de cada cultivar.

As plantas foram cultivadas sob alagamento contínuo e realizada a coleta do CH<sub>4</sub> quinzenalmente a partir do 16º dia após o transplante (sete dias após o alagamento). A coleta do CH<sub>4</sub> foi realizada utilizando o método da câmara fechada estática (MOSIER, 1989), realizada em intervalos de 5 mim, nos tempos 5, 10 e 15 mim, com o auxílio de uma seringa plástica (20 mL) previamente tratada com gás N<sub>2</sub>.

A análise do CH<sub>4</sub> foi realizada por cromatografia gasosa em cromatógrafo SHIMADZU GC-2014 (Mod. "Greenhouse"), equipado com três colunas empacotadas funcionando a 70°C, N<sub>2</sub> como gás de arraste a um fluxo de 26 mL min<sup>-1</sup>, injetor com alça de amostragem direta de 1 mL e temperatura de 250 °C, detector de ionização de chama (FID) a 250 °C. O fluxo de CH<sub>4</sub> foi calculado com base na equação 4.

$$f = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{PV}{RT} \quad (\text{equação 4})$$

onde,  $f$  é fluxo de CH<sub>4</sub> ( $\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ),

$Q$  é a quantidade do gás na câmara no momento da coleta ( $\mu\text{g CH}_4/\text{câmara}$ ),

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

$V$  é o volume da câmara (L),

$\Delta t$  é o tempo de coleta,

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

$T$  é a temperatura no interior da câmara no momento da coleta (°K).

A taxa de aumento da concentração do gás no interior da câmara foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo de coleta. Os efluxos de CH<sub>4</sub> em cada coleta foram assumidos como sendo as médias diárias (COSTA et al., 2008). A partir dos valores de fluxo calculados, foi estimada a emissão total do período do experimento pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores de emissão de CH<sub>4</sub> em cada coleta no tempo, desde o alagamento do solo até o final do experimento (GOMES et al., 2009).

Duas plantas de cada cultivar foram previamente selecionadas para acompanhamento da área foliar. Foi realizada a contagem do número de folhas, o seu comprimento (CF), e a largura em meia altura (LF) e determinado a área foliar utilizando a seguinte equação:

$$AF(\text{cm}^2) = (LF \cdot 0,75) \cdot CF \quad (\text{equação 5})$$

onde  $AF$  é a área foliar em  $\text{cm}^2$ ,

$LF$  é a largura na posição mediana da folha,

$CF$  é o comprimento da lâmina da folha.

Também foi realizado o acompanhamento do número de perfilhos nestas plantas, ciclo de cada cultivar, estatura de plantas e a produção de matéria seca da parte aérea e a matéria seca de grãos das cultivares ao final do experimento.

Tabela 9 - Descrição das características das cultivares utilizada no experimento em casa de vegetação para avaliação dos atributos morfológicos.

Cultivar	Grupo	Ciclo <sup>(1)</sup> dias	Perfilhamento <sup>(1)</sup>	Tipo de planta <sup>(1)</sup>
Arize 1003	Híbrido	125	Alta	SI
Avaxi CL	Híbrido	115	Alta	SI
Bluebelle	Japônica	115	Média	Intermediário
BRS 7 Taim	Indica	130	Alta	Moderno-filipino
BRS Atalanta	Indica	100	Alta	Moderno-filipino
BRS Querência	Japônica	110	Alta	Moderno-americano
Carnaroli	Japônica	105*	Média	Tradicional
EMBRAPA 130	Japônica	135	Média	Intermediário
EPAGRI 108	Indica	147	Alta	Moderno-filipino
Farroupilha	Japônica	149*	Média	Tradicional
IAS Formosa	Japônica	140	Média	Tradicional
Inov CL	Híbrido	120	Alta	SI
IRGA 421	Indica	95	Alta	Moderno-filipino
IRGA 422 CL	Indica	121	Alta	Moderno-filipino
IRGA 424	Indica	132	Alta	Moderno-filipino
Koshihikari	Japônica	100*	Alta	Tradicional
SCS 114 Andosan	Indica	140	Média	Moderno-filipino
SCS 116 Satoru	Indica	144	Alta	Moderno-filipino
SCS BRS Tio Taka	Indica	141	Média	Moderno-filipino

<sup>(1)</sup>Dados de Marchesan (2005), Terres et al. (2004) e nos materiais de divulgação dos detentores das cultivares, com exceção das identificadas com \* cujos dados são obtidos com cultivo em casa de vegetação: SI – Sem informação.

Os resultados de efluxo de CH<sub>4</sub>, produção de grãos e matéria seca da parte aérea do arroz foram submetidos a análise da variância e determinado o desvio padrão. Utilizou-se o procedimento Stepwise de modelagem de regressão entre o efluxo de CH<sub>4</sub> e as variáveis produção de grãos, produção de matéria seca, área foliar média, estatura final das plantas, número médio de perfilhos e número médio de folhas.

### 4.1.3 RESULTADO E DISCUSSÕES

As 19 cultivares avaliadas no experimento foram separadas em três grupos em função do potencial de efluxo de  $\text{CH}_4$  determinado (Figura 14). O comportamento de efluxo de  $\text{CH}_4$  durante o período de desenvolvimento das plantas foi semelhante entre as 19 cultivares, independente do grupo acima classificado (Figura 14a, 14b e 14c). Na primeira coleta de  $\text{CH}_4$ , aos 7 dias após o transplante (DAT), o efluxo de  $\text{CH}_4$  foi nulo para a maioria das cultivares (Figura 14a, 14b e 14c). Aos 20 DAT, ocorreu o primeiro pico de efluxo de  $\text{CH}_4$  (Figura 14a, 14b e 14c). Este momento coincide com o curso da redução do solo após o alagamento e o aumento na disponibilidade de carbono no solo. Segundo Silva et al. (2011), a intensificação da produção de  $\text{CH}_4$  nos solos alagados ocorre após a redução do nitrato e dos compostos de Mn(III e IV) e de Fe(III), o que leva em torno de 20 dias para ocorrer, dependendo das características do solo. Convém salientar que aos 20 DAT as plantas estavam próximas ao início do perfilhamento, estágio vegetativo em que as estruturas morfológicas não estão totalmente desenvolvidas. Por este motivo, o potencial da planta em transportar  $\text{CH}_4$  produzido no solo até a atmosfera é baixo, independente do potencial de efluxo total das cultivares ou das condições de redução do solo (Figura 14a, 14b e 14c). Estes dados corroboram com os dados de Aulakh et al. (2000c), que também demonstraram o baixo potencial de efluxo de  $\text{CH}_4$  nesta fase de desenvolvimento.

A partir 34 DAT ocorreu um aumento no efluxo de  $\text{CH}_4$  com o desenvolvimento do arroz (Figura 14). Este aumento foi associado ao estágio de desenvolvimento do arroz (AULAKH et al., 2002). Os efluxos máximos de  $\text{CH}_4$  ocorreram no florescimento da cultura, entre 65 e 75 DAT para a maioria das cultivares (Figura 14). No início do estágio de diferenciação da panícula ocorre um aumento na capacidade de transporte de  $\text{CH}_4$  pelo aumento do número de perfilhos e da área foliar da planta (AULAKH et al., 2002). A máxima capacidade de transporte de  $\text{CH}_4$  da planta de arroz ocorrerá na fase de florescimento pleno da cultura (AULAKH et al., 2002). Nesta fase, o arroz está com suas estruturas morfológicas completamente desenvolvidas, aumentando o coeficiente de difusão de  $\text{CH}_4$  na planta e permitindo altos efluxos de  $\text{CH}_4$  (AULAKH et al., 2002).

Este alto efluxo de CH<sub>4</sub> ocorre também devido a grande exsudação radicular nesta fase da cultura (HUANG et al., 2002). A alta exsudação radicular aumenta a disponibilidade de compostos orgânicos de baixo peso molecular, que são substratos para as bactérias metanogênicas produzirem CH<sub>4</sub>, aumentando a produção deste no solo (Le MER; ROGER, 2001). Juntos, a alta capacidade de transporte de CH<sub>4</sub> do arroz e a alta produção de CH<sub>4</sub> no solo nesta fase devem determinar as taxas máximas de efluxo de CH<sub>4</sub> encontradas (Figura 14a, 14b e 14c). Como as condições ambientais foram iguais (solo e clima), as diferenças no efluxo de CH<sub>4</sub> durante o ciclo da cultura ocorrem em função do efeito das plantas no sistema, sendo resultantes da produção no solo e da capacidade de transporte de CH<sub>4</sub> até a atmosfera de cada cultivar (Figura 14a, 14b e 14c). Em função disso, as cultivares Carnaroli, Farroupilha, IAS Formosa, SCS 114 e SCS Tio Taka foram classificadas em cultivares com alto potencial de efluxo máximo de CH<sub>4</sub> (Figura 14a). As cultivares Koshihikari, Irga 421, Irga 422, Avaxi CI, BRS Bojuru, Epagri 108 e SCS 116 foram as cultivares classificadas com médio potencial de efluxo (Figura 14b). As cultivares Inov CI, BRS Taim, Atalanta, Bluebelle, BRS Querência, Arize 1003 e Irga 424 são cultivares classificadas com baixo potencial de efluxo de CH<sub>4</sub> (Figura 14c).

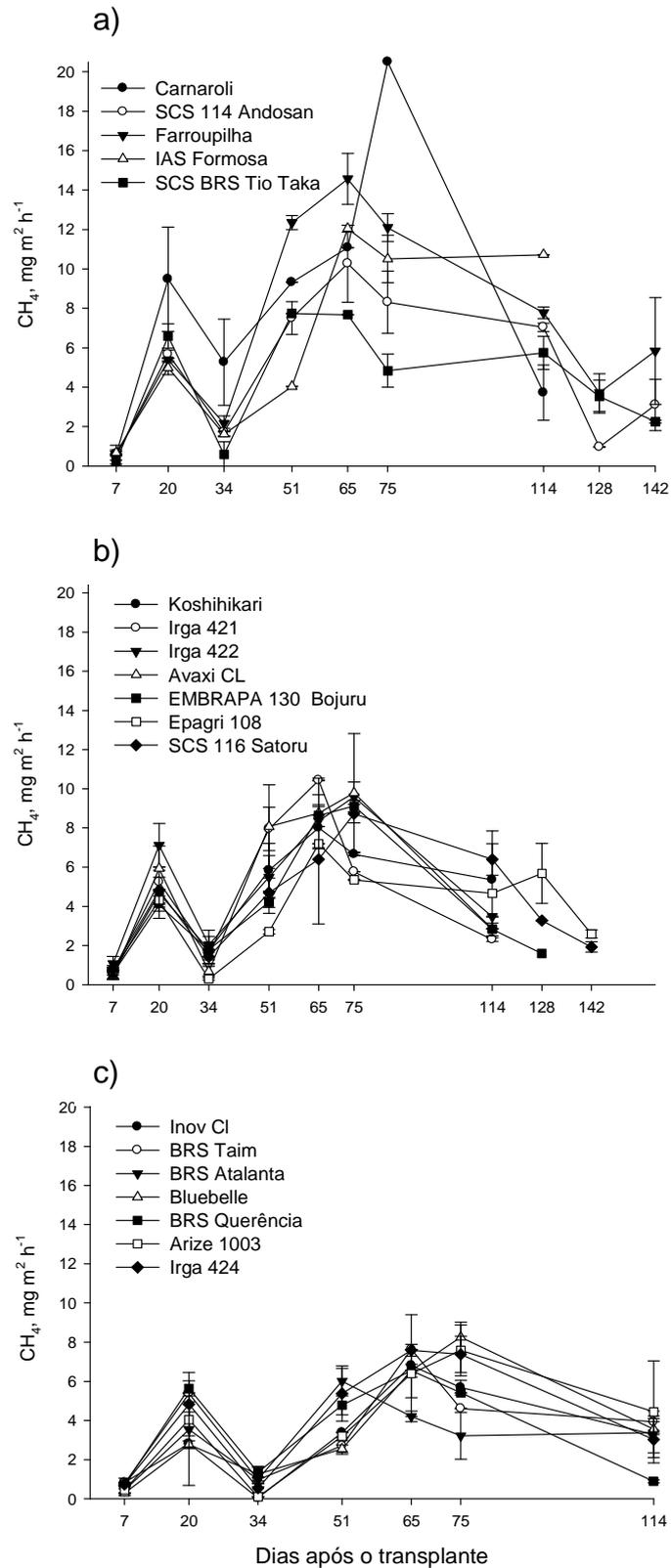


Figura 14 - Taxas de efluxo de CH<sub>4</sub> em cultivares de arroz irrigado em função do alagamento do solo durante o ciclo da cultura. Cultivares com: (a) alto potencial de efluxo de CH<sub>4</sub>; (b) médio efluxo de CH<sub>4</sub>; (c) baixo efluxo de CH<sub>4</sub>.

A divisão das cultivares em grupos em função de sua origem não explicou as variações nas taxas máximas de efluxo de CH<sub>4</sub> entre as cultivares. Mesmo a divisão das cultivares por tipo de planta, tradicional, intermediária ou tipo moderno-filipino, não foi satisfatória para explicar as diferenças entre as espécies quanto ao potencial de efluxo de CH<sub>4</sub> (dados não apresentados). Assim, as características que influenciam as taxas de efluxo dependem de propriedades morfológicas específicas de cada cultivar que independem de sua origem ou tipo de planta (Tabela 9).

Mitra et al. (1999) encontram que as cultivares do tipo tradicional são cultivares com maior taxa de efluxo de CH<sub>4</sub>. Segundo os autores, estas cultivares apresentam maior efluxo de CH<sub>4</sub> devido a maior produção de matéria seca e, conseqüentemente, maior exsudação radicular, favorecendo a produção e o escape de CH<sub>4</sub> para a atmosfera. No entanto, no presente experimento, o tipo de cultivar não explicou completamente as diferenças existentes entre as cultivares estudadas. As cultivares Carnaroli, Farroupilha, SCS 114, SCS Tio Taka e IAS Formosa são cultivares que apresentaram alto potencial de efluxo de CH<sub>4</sub> sendo estas pertencerem aos grupos indica e japônica, e plantas do tipo tradicional e do tipo moderno-filipino (Figura 14a). O mesmo comportamento aconteceu com as cultivares com médio e baixo potencial de efluxo de CH<sub>4</sub> (Figura 14a e Figura 14b). Cultivares altamente produtivas, com alta eficiência na produção de grãos e alta atividade fotossintética, podem ter uma alta produção de CH<sub>4</sub> no solo. Isso torna o gradiente de concentração do CH<sub>4</sub> entre o solo e a atmosfera alto, aumentando a difusão de CH<sub>4</sub> na planta (Van BODEGOM et al., 2001). No entanto, se estas cultivares apresentarem um alto potencial de produção de grãos, as quantidades emitida de CH<sub>4</sub> por kg de grãos de arroz produzido pode ser menor, aumentando a eficiência na produção de arroz com menor impacto ambiental.

As cultivares Carnaroli, Farroupilha e IAS Formosa apresentaram os maiores efluxos acumulados de CH<sub>4</sub>, com 25,6, 26,2 e 24,3 g m<sup>-2</sup> respectivamente (Tabela 10). As cultivares SCS 114 Andosan e SCS Tio Taka, embora sejam cultivares do tipo Indica, apresentaram efluxos altos, com 20,5 e 18,7 g m<sup>-2</sup>, respectivamente (Tabela 10). As cultivares do tipo moderno-filipino que possuem ciclo longo, igual ao ciclo das cultivares Farroupilha e IAS Formosa do tipo tradicional, também tiveram efluxo de CH<sub>4</sub> altos (Tabela 10).

As cultivares que apresentaram um efluxo total intermediário de CH<sub>4</sub> foram as cultivares Irga 421 e SCS 116 Satoru, com valores de efluxo totais de 12,9 e 16,4 g

$\text{m}^{-2}$  de  $\text{CH}_4$  respectivamente (Tabela 10). As cultivares que apresentaram baixo efluxo total de  $\text{CH}_4$  tiveram efluxos inferiores a  $11,8 \text{ g m}^{-2}$  de  $\text{CH}_4$  (Tabela 10). As cultivares com destaque neste grupo foram Arize 1003, Bluebelle, BRS Atalanta, BRS Querência, BRS Taim, Inov CL, Irga 424 com efluxo de 11,0, 10,8, 10,0, 8,5, 9,8, 9,2,  $11,8 \text{ g m}^{-2}$  de  $\text{CH}_4$ , respectivamente. As cultivares com baixo efluxo de  $\text{CH}_4$  se distribuíram nos três grupos em função de sua origem, sendo três delas do grupo Indica (moderno-filipino) duas cultivares híbridas e duas do grupo Japônicas (intermediária e moderno-americano).

A produtividade de grãos foi maior nas cultivares híbridas Avaxi CL, Arize 1003 e Inov CL, com produção de 63,0, 61,1 e 61,8 gramas por vaso respectivamente. A menor produção de grãos foi obtida com a cultivar Irga 421, com apenas 23,5 gramas por vaso. As demais variedades tiveram uma produção maior, com valores que variaram de 30,7 até 56 gramas de arroz por vaso nas cultivares Bluebelle, BRS Querência, BRS Taim, Epagri 108, IAS Formosa, Irga 422, Irga 424, SCS 114 Andosan, SCS 116 Satoru e SCS Tio Taka (Tabela 10). A produção de matéria seca foi alta nas cultivares BRS Atalanta, Epagri 108, Farroupilha, IAS Formosa, SCS 114 Andosan e SCS Tio Taka, todas com estatura média ou alta (Tabela 10). As cultivares com menor produção de matéria seca foram Avaxi CL, Bluebelle, BRS Taim, Inov CL, Irga 422, Irga 424 e Carnaroli, todas elas com ciclo inferior a 120 dias e estatura baixa, com exceção da cultivar Carnaroli (Tabela 10).

O efluxo de  $\text{CH}_4$  por kg de arroz produzido teve uma alta variação entre as cultivares (Tabela 10), com valores de  $148 \text{ mg de CH}_4 \text{ kg}^{-1}$  de arroz produzido até o valor máximo de  $852 \text{ mg de CH}_4 \text{ kg}^{-1}$ . As diferenças entre as cultivares foram altas, indicando que as com menor efluxo de  $\text{CH}_4$  por kg de arroz produzidos são cultivares eficientes em produzir com menor efluxo de  $\text{CH}_4$  ao ambiente. As cultivares com alto efluxo de  $\text{CH}_4$  por kg de arroz produzido novamente foram as que tiveram os maiores efluxos acumulados com destaque para as cultivares Farroupilha e Carnaroli com efluxo de 852 e  $695 \text{ mg de CH}_4 \text{ kg}^{-1}$  de arroz produzido. As cultivares com menores efluxo por kg de arroz produzido foram as que apresentaram um alto potencial produtivo. As cultivares híbridas tiveram os menores efluxos ( $235$ ,  $179$  e  $148 \text{ mg de CH}_4 \text{ por m}^{-2}$  para as cultivares Avaxi CL, Arize 1003 e Inov CL, respectivamente). As cultivares Bluebelle, BRS Atalanta, BRS Querência, BRS Taim, Irga 424 e Koshihikari também tiveram comportamento semelhante, com efluxo oscilando entre estes valores (Tabela 10).

Embora os resultados encontrados sejam resultantes de cultivo em casa de vegetação e o potencial produtivo no campo possa diferir das condições de campo, as cultivares com alto potencial produtivo são indicadas como uma forma de aumentar a eficiência da utilização dos recursos naturais para a produção de alimentos (IPCC, 2007). Neste sentido, a utilização deste atributo para selecionar espécies com menor potencial de efluxo de  $\text{CH}_4$  pode ser uma forma eficiente de diminuir os efeitos negativos do cultivo de arroz sobre o ambiente. Cultivares de ciclo curto e com alto potencial produtivo são potencialmente mitigadoras do efluxo de  $\text{CH}_4$ , em função do menor tempo em que as culturas ficam no campo, menor produção de matéria seca e alto potencial produtivo (Tabela 10).

Tabela 10 - Efluxo total de CH<sub>4</sub> e a produtividade de grãos e matéria seca de cultivares de arroz cultivado em casa de vegetação.

Cultivar	Efluxo				Produtividade			
	Total		kg arroz		grãos		MS	
	g m <sup>2</sup>	DP	mg kg <sup>-1</sup>	DP	g vaso <sup>-1</sup>	DP	g vaso <sup>-1</sup>	DP
BRS Atalanta	8,5d	1,0	240,5	28,6	35,4	0,1	77,5	1,9
Inov CL	9,1d	2,1	148,2	24,0	61,8	4,5	46,3	1,0
BRS Querência	9,7d	0,2	175,8	2,4	55,4	0,6	53,3	0,6
BRS Taim	10,0d	0,2	190,7	10,7	52,3	1,8	49,8	0,2
Bluebelle	10,7d	0,1	213,3	12,9	50,5	2,9	55,1	6,9
Arize 1003	10,9d	1,3	179,1	24,0	61,1	0,9	63,1	3,5
Irga 424	11,8d	0,1	210,6	9,5	56,1	2,2	49,8	1,1
Epagri 108	12,8c	0,7	311,2	6,2	39,3	3,1	90,4	0,3
Irga 421	12,9c	0,2	546,7	18,9	23,5	1,1	60,4	1,7
Koshihikari	12,2c	1,0	240,4	45,0	53,9	6,0	62,5	0,8
Embrapa 130 Bojuru	13,8c	0,9	371,0	8,4	37,2	3,1	68,3	8,7
Avaxi CL	14,8c	2,2	235,6	44,4	63,0	1,9	56,3	6,9
Irga 422	14,9c	0,2	274,9	20,5	54,4	4,8	55,4	1,9
SCS 116 SATORU	16,4c	1,6	407,5	86,3	40,3	11,8	66,6	9,4
SCS Tio Taka	18,7b	0,7	423,8	10,7	44,0	2,9	83,2	3,2
SCS 114 ANDOSAN	20,5b	1,4	433,2	54,6	47,3	2,6	79,2	2,3
IAS Formosa	24,3a	0,1	440,5	47,6	55,2	6,1	73,5	12,0
Carnaroli	25,5a	2,3	695,6	67,2	36,8	4,3	50,8	1,9
Farroupilha	26,2a	0,3	852,2	48,9	30,7	2,1	98,1	7,4
CV, %	12,1		19,4		14,6		11,1	

<sup>DP</sup> Desvio padrão; Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A figura 15 apresenta os resultados da regressão linear simples das cultivares entre o efluxo total de CH<sub>4</sub> com as características produtividade de grãos, produtividade de matéria seca, área foliar, estatura, número de perfilhos e número de folhas por planta. A produtividade de grãos não apresentou correlação significativa com o efluxo de CH<sub>4</sub> (Figura 15a). As características das plantas que determinam a produtividade de grãos não foram relacionadas com as características que determinam as taxas de efluxo de CH<sub>4</sub>. Como estas estruturas não influenciam diretamente nas características que definem o potencial de produção de grãos, se verifica uma baixa relação da produção de grãos com o efluxo de CH<sub>4</sub>. Por outro lado, a produção de matéria seca apresentou correlação significativa com o efluxo

total de CH<sub>4</sub> (Figura 15b). O aumento da produção de matéria seca das plantas aumentou o efluxo de CH<sub>4</sub> (Figura 15b). Segundo Wang et al. (1997), a maior produção de matéria seca de parte aérea está associada também com o maior desenvolvimento do sistema radicular, que aumenta a liberação de exudatos pelas raízes, e ao mesmo tempo aumenta a exposição da planta à difusão do CH<sub>4</sub> para o ambiente. Lindau e Bollich (1993), ao quantificarem o efluxo de CH<sub>4</sub> de solos com e sem presença de plantas de arroz irrigado, demonstraram que a quantidade emitida de CH<sub>4</sub> durante a estação de cultivo do arroz foi correlacionada com a matéria seca da parte aérea. Mitra et al. (1999), avaliando as emissões de CH<sub>4</sub> em cultivares de arroz, concluíram que maiores produções de matéria seca aumentam o efluxo total de CH<sub>4</sub>.

Considerando que a força que governa o transporte de CH<sub>4</sub> do solo até a atmosfera é gerada pelo gradiente de concentração de CH<sub>4</sub> formado entre o solo e atmosfera, a resistência à difusão do gás na planta e o número de canais que conectam o solo a atmosfera (Van BODEGON et al., 2001). Mantendo constante a resistência a difusão do gás na planta e o gradiente de concentração de CH<sub>4</sub> entre o solo e a atmosfera, o aumento de canais condutores será o fator que determinará o potencial de efluxo de CH<sub>4</sub>. No entanto, não foi encontrada relação significativa entre o efluxo de CH<sub>4</sub> e a área foliar das plantas para um grupo composto de 19 cultivares diferentes (Figura 15c). Aulakh et al. (2002) também encontraram baixa relação entre estas variáveis ao agrupar 22 cultivares diferentes.

A estatura das plantas foi significativamente correlacionada com o efluxo de CH<sub>4</sub>, sendo que, quanto maior a estatura maior o efluxo (Figura 15d). Como algumas plantas que apresentaram maior estatura também apresentaram maior produção de matéria seca, essas variáveis estão associadas com a emissão de CH<sub>4</sub>, como abordado anteriormente. Nesta perspectiva, o número de perfilhos também irá desempenhar um importante papel neste transporte (Figura 15e). No entanto, este atributo não foi significativo, possivelmente pelas altas diferenças na capacidade de perfilhamento entre as cultivares. No presente experimento, com uma alta variabilidade genética dos materiais e grandes diferenças entre as plantas não houve correlação entre estas variáveis (Figura 15e). Isso pode ter explicado a ausência de relação entre o efluxo de CH<sub>4</sub> e o número de folhas (Figura 15f). Essa variação também foi encontrada por Aulakh et al. (2002) quando se agrupou 22 cultivares para avaliação do potencial de efluxo de CH<sub>4</sub>.

As características morfofisiológicas que determinam o potencial de efluxo de CH<sub>4</sub> são associadas ao potencial produtivo da cultura e com as características que minimizem os efluxos de CH<sub>4</sub>. Para agrupar e estabelecer esta relação utilizou-se o procedimento Stepwise de modelagem de regressão entre o efluxo de CH<sub>4</sub> e as variáveis produção de grãos, produção de matéria seca, área foliar média, estatura final das plantas, número médio de perfilhos e número médio de folhas. O coeficiente de determinação entre as variáveis foi de 0,65, sendo que foram significativas as variáveis estatura e número de perfilhos,  $Y = -33,37 + 0,404$  (estatura, cm) + 0,711 (número de perfilhos). A variável estatura foi responsável em apenas 36% no efluxo total, e a variável número de perfilhos em 29%. A baixa significância do modelo em determinar os fatores responsáveis pelo efluxo de CH<sub>4</sub> indicam a alta variabilidade nos atributos morfofisiológicos entre as cultivares estudadas. A associação entre os atributos fisiológicos com a morfologia interna das cultivares de arroz passa ser uma hipótese para o baixo grau de significância entre as variáveis.

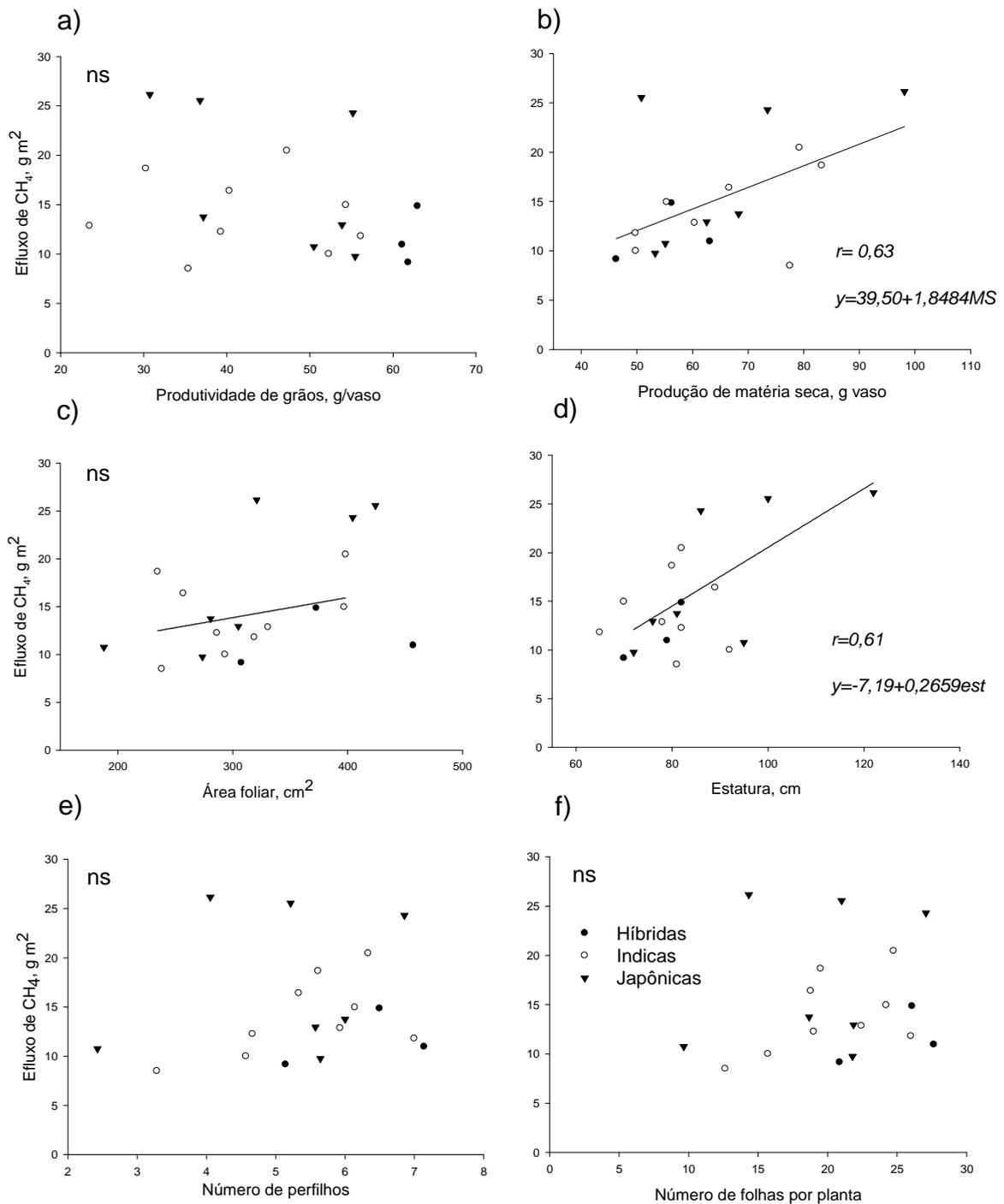


Figura 15 - Regressão linear simples entre o efluxo de  $\text{CH}_4$  e as variáveis: a) produtividade de grãos; b) matéria seca; c) área foliar; d) estatura; e) número de perfilhos; f) número de folhas por planta.

A seleção de cultivares de arroz com maior produtividade, mantendo os efluxos de CH<sub>4</sub> baixos, afetam na eficiência das cultivares de arroz em produzir grãos com um baixo impacto ambiental. As variedades de arroz de menor porte e alta capacidade de produção de grãos tornam-se mais eficientes em produzir arroz com menor impacto ambiental (Tabela 10). Estas características estão associadas a cultivares do tipo moderno filipino e cultivares híbridas, que também apresentaram um baixo efluxo de CH<sub>4</sub> por kg de arroz produzido (Tabela 10). Estas cultivares, tais como, Arize 1003, Avaxi CI, BRS Atalanta, BRS Querência, BRS Taim, Inov CI, Irga 422 e Irga 424 são cultivares potencialmente mitigadoras do efluxo de CH<sub>4</sub>. Elas apresentam como características comuns a baixa estatura, ciclo igual ou inferior a 114 dias e todas são do tipo moderno-filipino ou híbridas. Experimentos com cultivares para avaliação dos atributos da morfologia interna do arroz devem ser realizados para obter as respostas sobre o potencial de transporte de CH<sub>4</sub> pela plantas.

#### **4.1.4 CONCLUSÕES**

Embora a dinâmica de efluxo de CH<sub>4</sub> seja semelhante, há diferenças no potencial de efluxo de CH<sub>4</sub> em cultivares de arroz irrigado por alagamento.

As cultivares Arize 1003, Avaxi CI, BRS Atalanta, BRS Querência, BRS Taim, Inov CI, Irga 422 e Irga 424 apresentaram menor efluxo de CH<sub>4</sub> com a maior produtividade do arroz.

As características morfofisiológicas das cultivares de arroz não explicaram completamente as diferenças de efluxos de CH<sub>4</sub> entre as cultivares.

Características como a baixa produção de matéria seca e estatura, ciclo igual ou inferior a 114 dias e tipo moderno-filipino ou híbridas foram associadas às cultivares de arroz de menor efluxo de CH<sub>4</sub>.

## 4.2 CAPITULO II

### CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE CULTIVARES DE ARROZ COM ÊNFASE NA ROTA DE DIFUSÃO DE GASES ATRAVÉS DA PLANTA

#### 4.2.1 INTRODUÇÃO

O cultivo do arroz no Rio Grande do Sul utiliza o método de irrigação por alagamento contínuo do solo (SOSBAI, 2010). Essa condição de cultivo ocorre devido a uma adaptação desta cultura para suprir a demanda de oxigênio das raízes em uma ambiente anóxico (NEUE; SASS, 1994). O fornecimento de O<sub>2</sub> às raízes ocorre por difusão em estruturas desenvolvidas denominadas de aerênquimas (YOSHIDA, 1981). Os aerênquimas são espaços apoplásticos mais desenvolvidos em relação aos comúntes encontrados nos tecidos vegetais (EVANS, 2003). A sua formação pode ocorrer por processo de lise celular, sendo denominado de aerênquimas lisígenos ou por diferenciação estrutural de células, sendo denominado de esquizógeno (EVANS, 2003).

Essa estrutura fornece uma rota de baixa resistência à difusão de gases, favorecendo que os gases do solo atingem a atmosfera (N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>). A alta capacidade de fornecimento de oxigênio às raízes, promovida pelos aerênquimas, permite que a rizosfera do arroz mantenha uma zona de até 4 milímetros oxidada (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Essa zona de oxidação favorece o processo de oxidação do CH<sub>4</sub> por bactérias metanotróficas, gerando CO<sub>2</sub>, (BODEGOM; GOUDRIAAN; LEFFELAAR, 2001). O suprimento de oxigênio no sistema radicular do arroz estimula a atividade dessas bactérias, que habitam a zona aeróbia em torno das raízes, ou mesmo no interior, contribuindo com a diminuição dos efluxos de CH<sub>4</sub> (BOSSE; FRENZEL, 1997; BODEGOM et al., 2001). A saturação do ambiente cultivado com arroz com N<sub>2</sub> aumentou os efluxos de CH<sub>4</sub> em 242%, associada a ausência da atividade das bactérias metanotróficas (DENIER Van Der Gon; BREEMEN, 1993), indicando a importância do suprimento de oxigênio na rizosfera do arroz para promover a oxidação do CH<sub>4</sub> ainda no solo. O efluxo de CH<sub>4</sub> para a

atmosfera depende do equilíbrio entre as quantidades produzidas e oxidadas de CH<sub>4</sub> (BODEGOM et al., 2001), chegando a 40% do CH<sub>4</sub> produzido no solo é oxidado na rizosfera do arroz (DENIER Van Der Gon; NEUE, 1996). Entretanto, um componente importante neste processo é a resistência a difusão do CH<sub>4</sub> na planta de arroz, que afeta o equilíbrio entre a produção e oxidação de CH<sub>4</sub> no solo, influenciando nas taxas de efluxo de CH<sub>4</sub>.

As cultivares de arroz diferem na magnitude dos efluxos de CH<sub>4</sub> (LINDAU et al., 1995; WATANABE et al. 1995; BUTTERBACH-BAHL; PAPEN; RENNENBERG, 1997) que tem sido associado com diferenças na capacidade de transporte de CH<sub>4</sub>. Butterbach-Bahl, Papen e Rennenberg (1997) encontraram diferenças nos efluxos de CH<sub>4</sub> entre duas cultivares de arroz, atribuídas à anatomia do sistema de aerênquima entre as cultivares. Utilizando a microscopia eletrônica de varredura, Butterbach-Bahl; Papen e Rennenberg (2000) não identificaram diferenças morfológicas na estrutura dos aerênquimas entre duas cultivares de arroz, sendo que estas apresentaram efluxos diferentes de CH<sub>4</sub>. A região nodal do arroz possui uma barreira que pode limitar a difusão de CH<sub>4</sub> na planta (AULAKH et al., 2000c), no entanto, não se conseguiu identificar quais características estruturais limitam a difusão. A resistência a difusão do CH<sub>4</sub> na planta de arroz pode ser um fator que contribui com a mitigação do efluxo de CH<sub>4</sub> para a atmosfera.

A idade da planta exerce papel fundamental na resistência a essa difusão (AULAKH, 2001). As plantas jovens até o estágio de diferenciação da panícula possuem alta resistência a difusão do CH<sub>4</sub>, tendo assim baixa capacidade de efluxo de CH<sub>4</sub>. Aulakh et al. (2000c) encontraram alta variação nas características morfológicas e fisiológicas entre as cultivares de arroz. Isso é importante e explica as diferenças na condutância de CH<sub>4</sub> entre as cultivares (Aulakh et al. 2000c). Embora os parâmetros fisiológicos sejam importantes (Estudo II, Capítulo I), os parâmetros morfológicos podem afetar a difusão do CH<sub>4</sub> na planta, permitindo assim aumentar as taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> na rizosfera do arroz, diminuindo os efluxos de CH<sub>4</sub> (BUTTERBACH-BAHL; PAPEN; RENNENBERG, 2000). A avaliação de características da morfologia interna do arroz foi realizada por Aulakh et al. (2000c) que avaliaram diferentes cultivares a fim de relacionar as características morfológicas com os efluxos de CH<sub>4</sub> (AULAKH, 2000c). Embora os esforços tenham sido no sentido de identificar atributos morfológicos, os resultados não são conclusivos, pois indicaram apenas que a região do nó podem apresentar limitações

a difusão do CH<sub>4</sub> (AULAKH, 2000c; DAS; BURUAH, 2008). Enquanto Groot et al. (2005) encontrou que a maior resistência a difusão do CH<sub>4</sub> ocorre na zona de transição entre o sistema radicular e a parte aérea, Denier Van Der Gon e Breemen (1993) não encontraram limitação a difusão de gases no arroz.

A caracterização do transporte de CH<sub>4</sub> pela planta de arroz torna-se indispensável para identificar se as estruturas internas capazes de promover o aumento da resistência a difusão de CH<sub>4</sub>. A comparação da morfologia interna de espécies com distintas capacidades de efluxo de CH<sub>4</sub> possibilita avaliar se as diferenças no efluxo de CH<sub>4</sub> estão relacionadas com os parâmetros fisiológicos ou morfológicos, que poderão auxiliar em novos estudos visando a mitigação dos gases de efeito estufa no arroz irrigado por alagamento. O objetivo deste trabalho foi descrever a morfologia interna do arroz, a provável rota de difusão de gases na planta e associar com a capacidade de efluxo de CH<sub>4</sub> em diferentes cultivares de arroz.

#### **4.2.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento foi instalado na casa de vegetação do Departamento de Solos da UFSM em novembro de 2009 e conduzido até março de 2010. O experimento constituiu-se do cultivo de 19 cultivares de arroz disponíveis para o cultivo comercial nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. As cultivares de arroz foram selecionadas visando abranger uma ampla variabilidade genética. As cultivares híbridas selecionadas foram: Avaxi e Inov CL (Ricetec) e Arize QM 1003 (Bayer) e as variedades foram: BRS querência, BRS Atalanta, BRS Taim e BRS Bojuru, Irga 422 CL, Irga 421 e Irga 424, EPAGRI 108, SCS BRS Tio Taka, SCS114 Andosan e SCS 116 Satoru e IAS Formosa, Bluebelle, Carnaroli, Koshihikari e Farroupilha. Foram colocadas para pré germinar aproximadamente 20 sementes de cada variedade e após 7 dias foram transplantadas nos vasos com 7 kg de um Planossolo Hidromórfico típico de dimensões de 25 cm de diâmetro e 25 cm de altura. Após 4 dias realizou-se o desbaste deixando apenas 6 plantas por vaso.

As plantas foram cultivadas até a fase de florescimento pleno, sendo coletadas em aproximadamente 2 a 3 dias após o florescimento. Foram coletadas 3

plantas com os respectivos perfilhos e suas raízes. A coleta foi realizada com auxílio de uma pá de jardim, cortando-se o solo. Essa fração de solo foi lavada com água corrente até a remoção total do solo sem danificar as raízes. Imediatamente após a coleta, as plantas foram acondicionadas em sacos plásticos envoltas com jornal molhado para evitar a desidratação e encaminhadas ao Laboratório de Botânica Estrutural do Departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria.

Foram selecionados seis colmos com bainha, folhas e raízes para a secção e fixação do material, conforme descrito abaixo.

- 1- Folhas → secção transversal, divididas bainha da folha, lâmina da folha e a folha bandeira, separadas.
- 2- Colmo → secção transversal e longitudinal nos primeiros nós não alongado, e nos demais nós alongados.
- 3- Coroa → secção transversal e longitudinal.
- 4- Raízes → secção transversal e a coifa.

Foram selecionadas aproximadamente 5 porções de cada secção acima relatadas em diferentes perfilhos das 3 plantas inteiras coletadas. Estas secções foram cortadas com auxílio de uma lâmina em tamanho de aproximadamente 2 mm de espessura preparadas por meio da técnica de lâminas permanentes para a análise em microscopia óptica. As peças foram colocadas em solução de glutaraldeído a 3% em vácuo durante 24 horas e com tempo máximo de exposição de 72 horas. Após foram colocadas em solução de Tween 20 ml L<sup>-1</sup> durante 24 horas. Posteriormente as peças foram desidratadas em uma série etanólica, em etanol 70 ° GL até a confecção das lâminas.

Após a desidratação, as peças foram submetidas a solução de clorofórmio e etanol, passando por mais uma série de desidratação. As soluções de clorofórmio e álcool são compostas de: solução 1) 75% álcool e 25% clorofórmio, solução 2) 50% álcool e 50% clorofórmio, solução 3) 75% clorofórmio e 25% álcool. As peças foram submetidas às séries dessas soluções, por 30 min cada (solução 1-2-3-2-1). Após esse procedimento foram colocadas em solução de pré-infiltração por 2 horas, posteriormente, em resina pura por 24 horas. Os blocos foram cortados em micrótomo, em seção transversal, com espessuras de 5 a 7 µm, coradas com Azul de Toluidina – AZT (0,05% AZT). A montagem foi realizada com Entellan e submetida a secagem durante 72 horas. As lâminas foram submetidas a avaliação em microscopia óptica, em microscópio Leica DM 2000.

A avaliação das características morfológicas foi realizada no estágio de florescimento, onde foi realizada a coleta do arroz. A avaliação da morfologia interna do arroz foi realizada em 9 cultivares (Arize 1003, Avaxi CL; Bluebelle, BRS Querência, Carnaroli, Irga 424, Farroupilha e IAS Formosa), aquelas que apresentaram as maiores diferenças entre os efluxos de CH<sub>4</sub> e maior abrangência dos materiais genéticos.

### **4.2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **4.2.2.1 Caracterização da morfologia da planta de arroz**

##### **Caracterização das folhas**

A morfologia interna da folha mostra que, de maneira geral, a bainha e lâmina foliar possuem sistema dérmico composto por epiderme, com uma única camada de células, sistema fundamental predominantemente parenquimático e sistema vascular composto por feixes vasculares colaterais (Figuras 16a, Figura 16b).

A epiderme superior e inferior da lâmina da folha é formada por uma única camada de células lignificadas e alongadas (Figura 16b). As células epidérmicas são justapostas. O aspecto denso desta camada indica uma baixa capacidade de troca de ar e água com o ambiente. A lâmina da folha apresenta ligação com a atmosfera via estômatos (Figura 16d), principal rota de influxo de CO<sub>2</sub> e efluxo de CH<sub>4</sub> entre a planta e a atmosfera. No mesofilo foliar encontram-se as células do parênquima, não diferenciado em paliçádico e esponjoso (Figura 16b). O estômato é formado por duas células guarda na epiderme abaxial e adaxial (Figura 16b e Figura 16d). Entre os feixes vasculares, na superfície adaxial, encontram-se as células buliformes (Figura 16a). Ao centro do corte transversal da lâmina da folha encontram-se dois espaços de ar grandes (Figura 16a). Em algumas cultivares estes espaços são divididos em secções menores, separados por uma ou duas camadas de células do parênquima (Figura 16a).

Na bainha da folha, a epiderme é formada por uma camada de células com arranjo compacto (Figura 16d). Na face abaxial as células possuem paredes

celulares espessadas e lignificadas, enquanto que na face adaxial as células possuem paredes delgadas e não lignificadas. A continuidade da epiderme, apenas na face abaxial, é interrompida pela ocorrência de estômatos. Na seção transversal as células epidérmicas se mostram isodiamétricas (Figura 16d), embora a literatura já tenha demonstrado que tais células são tabulares e alongadas paralelamente ao eixo axial do órgão (METCALFE, 1960).

O sistema fundamental é composto por tecido parenquimático, cujas células possuem arranjo, relativamente compacto, onde espaços intercelulares são observados nos vértices celulares. Cabe salientar que grandes espaços no parênquima, a semelhança de ductos que se desenvolvem por toda a folha, pela perda de continuidade das células, as quais acabam se separando e se afastam em função do processo de expansão da bainha, também na lâmina foliar. Tais espaços definem o mesofilo como aerenquimatoso, os quais configuram como espaços apoplásticos de grande volume (Figura 16c e Figura 16d). A análise microscópica mostra que existe continuidade entre os complexos estomáticos e os ductos de ar no mesofilo, uma vez que a câmara subestomática é composta por tecido frouxo e está conecta a tais ductos de ar (Figura 16d), que configura o local preferencial de entrada de ar. As células do mesofilo na bainha acumulam grandes quantidades de amido. No mesofilo são observados grupamentos celulares, compostos de fibras, as quais se organizam como calotas sobre os feixes vasculares, quando esses ocorrem superficialmente.

Os feixes vasculares são colaterais e desenvolvem elementos esclerenquimáticos, principalmente, através da diferenciação de células do periciclo, além de células que circundam o floema (Figura 16d).

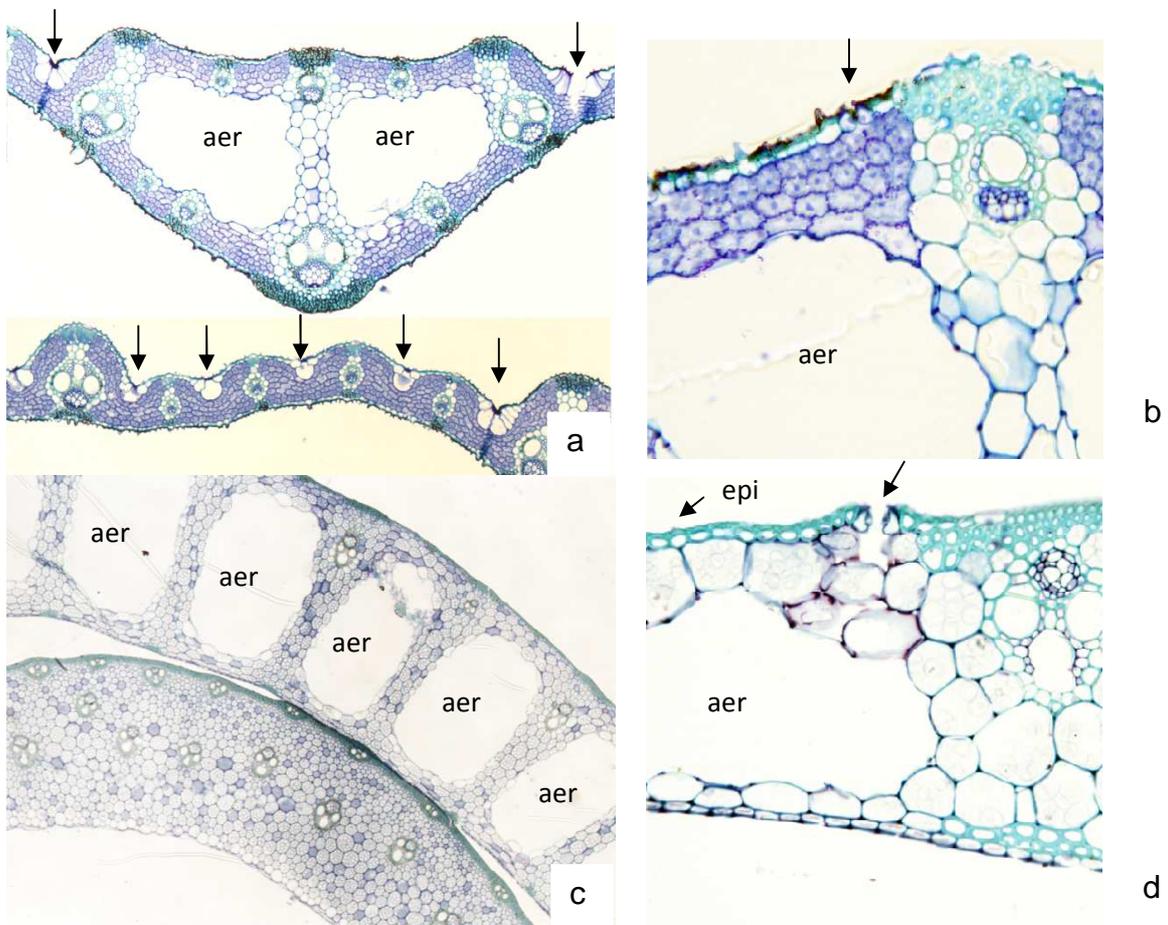


Figura 16 - Seção transversal da lâmina da folha do arroz (Figura a e Figura b) e da bainha da folha do arroz (Figura c e Figura d); a) visualização geral da lâmina da folha (aumento de 100x); b) epiderme abaxial da lâmina da folha, com a presença de estômato (aumento de 400x); c) aspecto geral da seção transversal da bainha da folha (aumento de 40x); d) detalhe da presença do estômato na bainha da folha separadas por poucas células parenquimáticas (aumento de 400X); aer = aerênquima; epi = epiderme.

### **Região do entrenó proximal a região do nó**

A visão geral do órgão é apresentada na Figura 17a. O sistema dérmico é composto por uma única camada de células, sendo comum a presença de células suberosas, estruturando-se como um tecido compacto (Figura 17b). As células comuns na seção transversal se mostram isodiamétricas a levemente alongadas tangencialmente (Figura 17b). Nas cultivares analisadas, a epiderme não desenvolveu complexos estomáticos e nem tricomas. O córtex apresentou tecidos com organização concêntrica (Figura 17a, 17c e 17b). A camada mais externa (subjacente a epiderme) se diferencia em tecido esclerenquimático com cinco a oito camadas celulares. Nesta região, as células não apresentam espaços intercelulares, configurando um tecido maciço abaixo da epiderme (Figura 17b).

A camada tissular abaixo da região esclerificada se diferencia em parênquima frouxo de células isodiamétricas e braciiformes, configurando um aerênquima lisígeno (Figura 17b). Em determinadas regiões as células colapsam e perdem totalmente a continuidade com as células vizinhas formando espaços intercelulares relativamente maiores (aerênquimas) (Figura 17c). A região tissular mais interna possui grande complexidade em função da presença do tecido vascular (Figura 17c). O limite externo de células ao tecido vascular é composto por células em arranjo compacto, as quais são isodiamétricas, com paredes espessadas e lignificadas; sendo tal camada celular continua às células do aerênquima externo. O sistema vascular é composto por feixes vasculares colaterais que, nesta região de vascularização, se orientam transversalmente com direcionamento tangencial, vertical e, também, são encontrados feixes com orientação oblíqua ou transversal radial, ligando feixes vasculares distintos (Figura 17c).

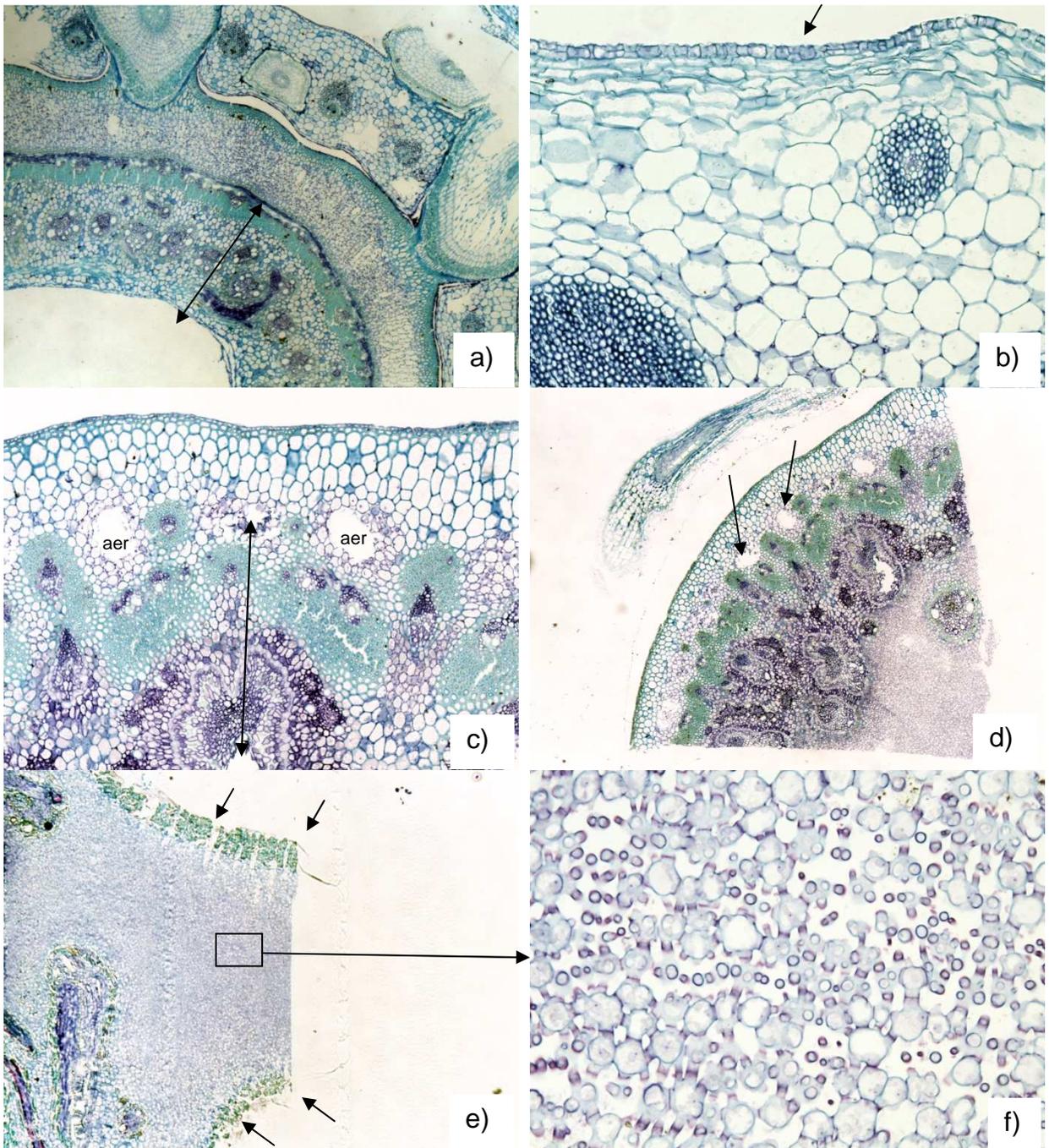


Figura 17 - Seção transversal da região nodal do arroz; a) aspecto geral da seção transversal próxima a coroa da raiz (aumento de 40x); b) detalhe do córtex (aumento de 200x); c) detalhe da epiderme (aumento de 200x); córtex apresentando aerênquimas, e região vascular do nó; d) aspecto geral do da região nodal (aumento de 40x); e) seção longitudinal da região nodal identificando a camada de células separando as cavidades medulares; f) detalhe da região nodal mostrando os espaços apoplásticos (aumento de 400x); aer = aerênquima.

### **Região do nó**

A epiderme possui apenas uma camada celular (Figura 17d). Estas são relativamente pequenas, com paredes celulares espessas e lignificadas. Nesta região não foram observados estômatos (Figura 17d). Abaixo da epiderme ocorre uma hipoderme esclerificada com uma ou duas camadas de células. As células da hipoderme são isodiamétricas com volumes variáveis, o que confere ao estrato um aspecto irregular. As demais células do córtex externo configuram um parênquima esclerificado, com células volumosas, poliédricas e com paredes lignificadas e levemente espessadas. Quatro a oito camadas de células podem ocorrer formando um contorno sinuoso a semelhança de cristas e depressões que se alternam (Figura 17d). Mais internamente, ocorre parênquima frouxo com células braciiformes, o qual não se diferencia como um tecido contínuo em função da presença de feixes vasculares, além de regiões onde as células perdem continuidade à semelhança da organização da cavidade medular, onde, portanto, se observa a formação espaços que se estendem pela altura do entrenó (Figura 17e). A região central apresenta feixes vasculares periféricos, os quais apresentam bainhas esclerificadas, que podem se tornar contínuas em função da proximidade dos feixes. Nesse contexto, as continuidades de feixes vasculares formam regiões de isolamento entre córtex e região vascular (Figura 17d). Locais de passagem são observados quando os feixes não apresentam suas bainhas esclerenquimáticas contínuas e o parênquima fundamental não se esclerifica, onde, em tal condição, as células parenquimáticas diferenciam-se com pequenos espaços intercelulares (Figura 17d).

A região central nodal não é vascularizada, ocorrendo um parênquima frouxo em função da diferenciação de células braciiformes (Figura 17e). A região de contato do tecido nodal com a cavidade medular apresenta tecido esclerenquimático, cujas células possuem grande espessamento parietal e lignificação (Figura 17e). É observada com regularidade esclerificação não contínua de células braciiformes, em contato com as cavidades medulares, configurando sua estrutura como locais de passagem e/ou contato para os entrenós (Figura 17f).

### **Caracterização do caule na região do entrenó**

O aspecto geral do caule na região do entrenó é apresentada na Figura 18a. O sistema dérmico do caule é formado por uma única camada de células (Figura 18b). As células apresentam uma disposição compacta, levemente alongadas e

suberosas formando um tecido extremamente compacto (Figura 18b). Após, ocorrem camadas de células comuns pequenas, compactas isodiamétricas com incidência até os vasos vasculares (Figura 18a). Algumas cultivares apresentam os vasos vasculares imediatamente abaixo da epiderme, formando na parte externa do caule ondulações. Os cilindros vasculares, suas células são isodiamétricas a levemente alongadas tangencialmente. Ao lado ocorre um denso número de fibras corticais, cuja função é apenas estrutural (Figura 18b). Ao centro da estrutura encontra-se o parênquima fundamental do caule (Figura 18b). Este parênquima varia seu diâmetro e o número de camadas celulares em função de sua localização. Nos entrenós próximos a coroa da raiz este parênquima é espesso, com células isodiamétricas grandes e com grandes espaços apoplásticos. Em determinadas regiões as células colapsam e perdem totalmente a continuidade com as células vizinhas formando espaços intercelulares relativamente maiores, com o desenvolvimento de aerênquimas com origem lisígena (Figura 18a e Figura 18c). Nos entrenós superiores não ocorre a formação de aerênquimas no caule (Figura 18b).

No centro do entrenó possui mais redes de canais vasculares distribuídos radialmente ao redor do caule (Figura 18c). O sistema vascular é composto por feixes nesta região de vascularização e se orientam transversalmente com direcionamento vertical (Figura 18c).

O tecido parenquimático, de maneira geral, não apresenta um arranjo compacto e com freqüência se observa espaços intercelulares. Cabe salientar que as células não são isodiamétricas, e estão separadas da cavidade medular por uma membrana resultante do colapso de células (Figura 18d).

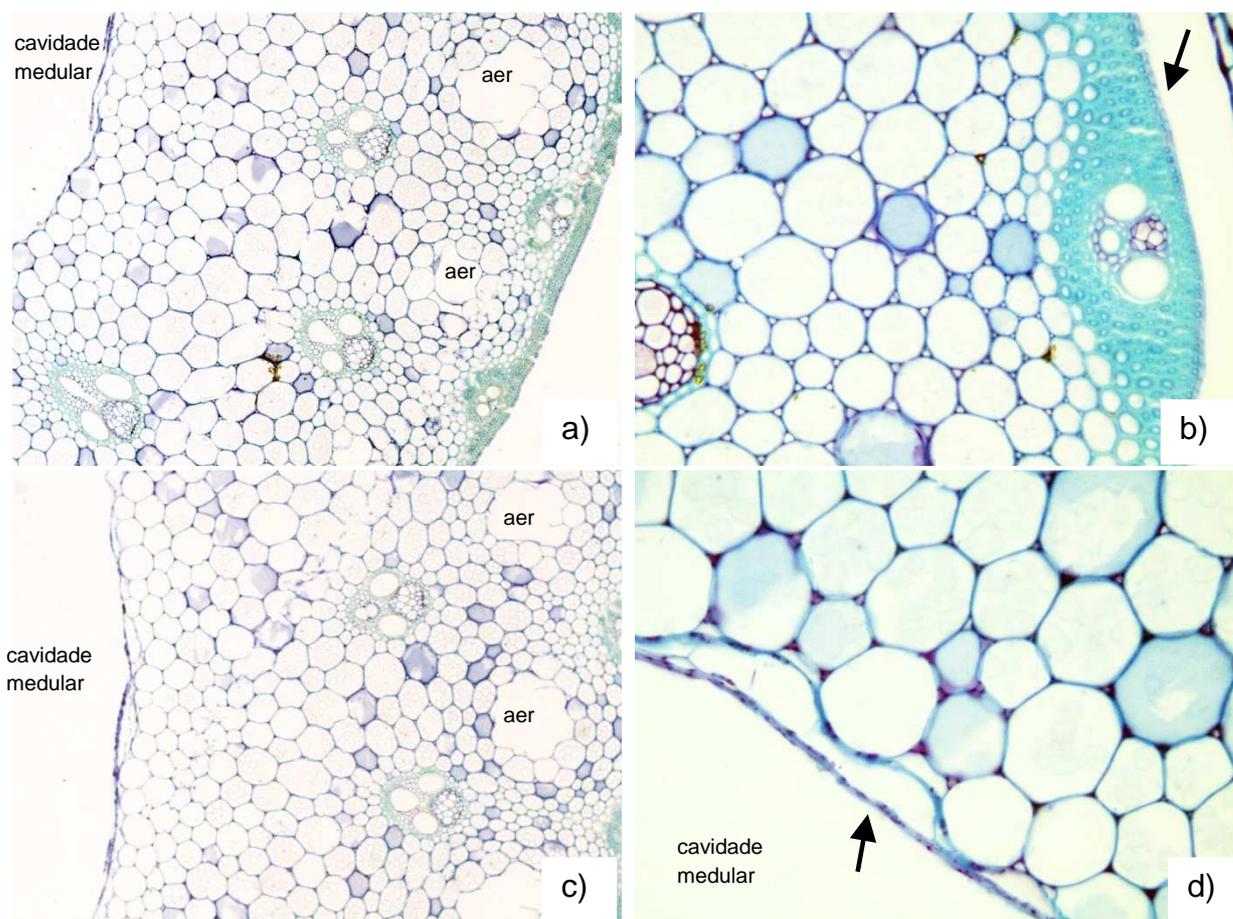


Figura 18 - Seção transversal do caule na região do entrenó do arroz; a) aspecto geral do caule (aumento de 40x); b) epiderme e cilindros vasculares externos (aumento de 200x); c) parênquima fundamental e aerênquimas no córtex do caule (aumento de 200x); d) região limítrofe entre o caule e a cavidade medular (aumento de 400x); aer = aerênquima.

### Caracterização do sistema radicular

Aspecto geral de um corte transversal de uma seção de raiz completamente desenvolvida (Figura 19a). A distribuição de células da epiderme da raiz é compacta e apresenta apenas uma camada de células isodiamétricas esclerificada (Figura 19c). Internamente, encontra-se uma camada de células da exoderme, compactas (Figura 19c). Abaixo se encontra o esclerênquima, caracterizando-se por células menores, lignificadas e alongadas, conferindo uma estrutura rígida de sustentação às raízes (Figura 19a).

A região do córtex é bem desenvolvida em todas as raízes das cultivares avaliadas. Em raízes jovens, o córtex apresenta distribuição radial densa, com

células grandes e com espaços apoplásticos (dados não apresentados). Em raízes maduras, o córtex é convertido em sua quase totalidade em aerênquimas (Figura 19a). As poucas células que ainda persistem são grandes e frouxas. A formação destes aerênquimas ocorre pelo colapso destas células, permanecendo apenas as paredes celulares em uma distribuição radial. A quantidade de células que formam esta camada varia de 8 a 15. Ao centro está localizada a endoderme, que se caracteriza por uma densa camada de células que circulam os vasos condutores (Figura 19b).

Na região central das raízes estão localizados os tecidos vasculares (Figura 16b). Uma ou mais camadas de células não vasculares formam o periciclo, que circunda totalmente os tecidos vasculares. No centro estão localizados de 1 a 6 vasos xilemáticos dispostos em forma centrípeta, sendo que os vasos de floema ocorrem na periferia deste. O número de tecidos vasculares (xilema e floema) no cilindro varia de acordo com o diâmetro da raiz. As células nesta região são densas, o que não permite a difusão de gases via apoplasto (Figura 19b).

O surgimento de novas raízes irá ocorrer a partir do cilindro vascular, o qual romperá a camada de células da epiderme, exoderme e do esclerênquima (Figura 19c). O rompimento destas camadas não elimina completamente a barreira de acesso de água na planta. A nova raiz é recoberta por camadas de células do parênquima (de 1 a 3 camadas de células), o que facilita a entrada de água e gases. Estas células são isodiamétricas com espaços apoplásticos grandes, o que auxilia o transporte de água e gases para o interior das plantas (Figura 19c e 19d).

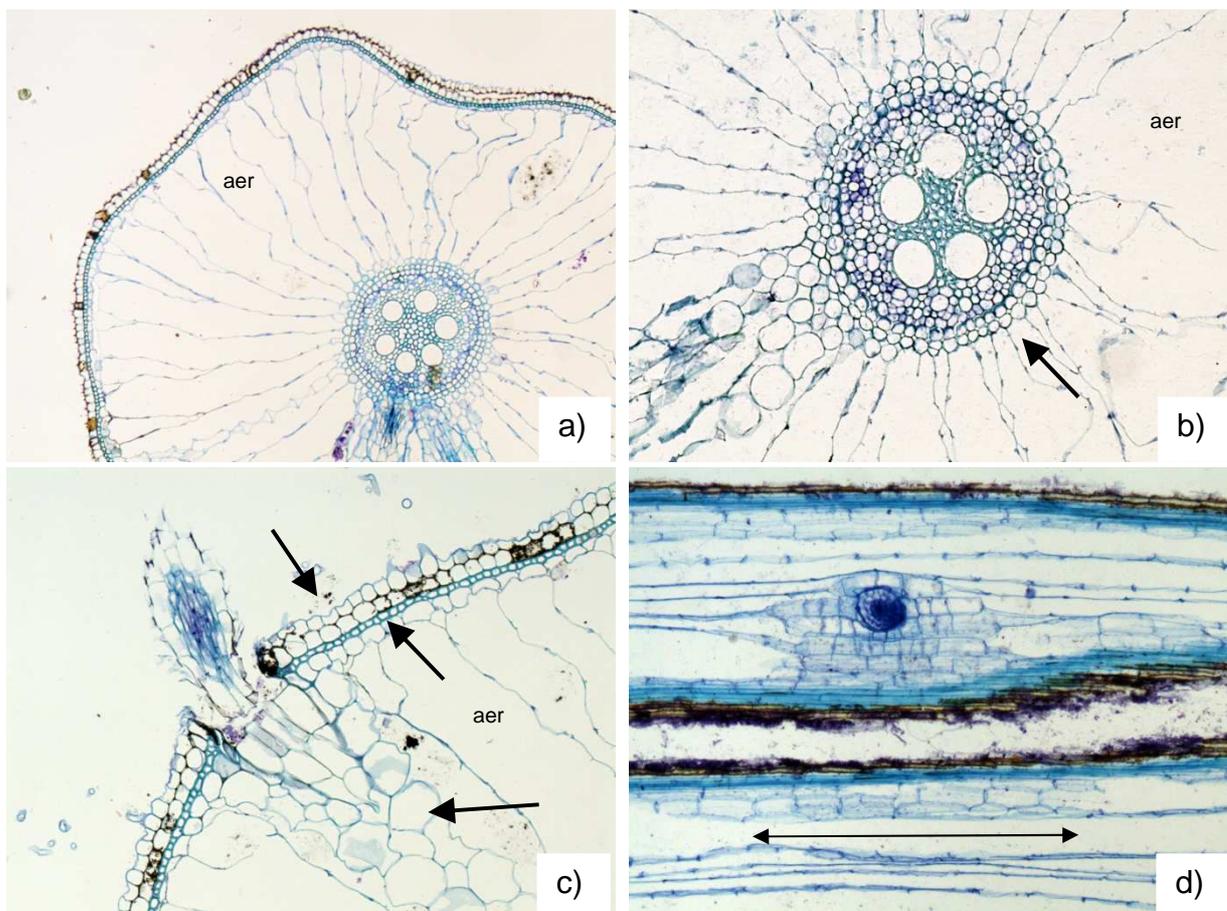


Figura 19 - Corte da seção transversal da raiz do arroz; a) epiderme, esclerenquima e córtex da raiz do arroz (aumento de 40x); b) sistema vascular das raízes (aumento de 200x); c) rompimento da epiderme e do esclerenquima durante a emergência de uma raiz nova de segunda ordem (aumento de 200x); d) espaço apoplástico durante o surgimento de uma nova raiz (aumento de 200x); aer = aerênquima.

#### 4.2.2.2 Rota da difusão do CH<sub>4</sub> na planta

O CH<sub>4</sub> é produzido no solo por bactérias anaeróbicas obrigatórias, utilizando como substrato para a metanogênese, compostos orgânicos de baixo peso molecular (CONRAD, 1996). A maior parte do CH<sub>4</sub> no solo está dissolvida na água próximo ao sistema radicular do arroz (NOUCHI; MARIKO; AOKI, 1990). A concentração de CH<sub>4</sub> nesta camada é alta, chegando a 15 mL de CH<sub>4</sub> por L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>O, o que equivale a 267.000 vezes a concentração de CH<sub>4</sub> na atmosférica (NOUCHI; MARIKO; AOKI, 1990). A alta concentração de CH<sub>4</sub> na água indica que a principal forma de entrada do CH<sub>4</sub> na planta é via o mecanismo de absorção de água

pela planta, embora não se descarte a importância da entrada de  $\text{CH}_4$  na planta na forma gasosa (AULAKH et al., 2000c). A emergência de raízes novas causa o rompimento da epiderme e da camada de esclerênquima na raiz (Figura 20a). O rompimento destas células compactas e esclerificadas permitem o acesso do  $\text{CH}_4$  até o córtex da raiz, com baixa resistência a sua difusão. A alta concentração de  $\text{CH}_4$  no solo permite a entrada de  $\text{CH}_4$  por difusão nesta região, independente do mecanismo de absorção de água pela planta.

Durante o processo de absorção de água pelas plantas, o  $\text{CH}_4$  difundido na água é rapidamente gaseificado no córtex da raiz (AULAKH et al., 2000c). Uma vez no córtex da raiz, o  $\text{CH}_4$  se movimenta por difusão, de áreas de maior concentração para áreas de menor concentração. As raízes maduras do arroz apresentam sistema de aerênquimas desenvolvidos e não apresentam barreiras que aumentem a resistência a sua difusão (Figura 19d). Por outro lado, a demanda de oxigênio pelo sistema radicular irá manter um fluxo de  $\text{O}_2$  contrário ao movimento de difusão do  $\text{CH}_4$ . O fluxo contrário de  $\text{O}_2$  até as raízes pode diminuir a difusão do  $\text{CH}_4$  das raízes em direção a parte aérea do arroz. Estas considerações indicam que não apenas o fator morfológico irá influenciar na condutância dos gases pela planta, conforme relatado por Aulakh et al. (2000b). Outros fatores relacionados a fisiologia da planta também influencia na resistência dos gases na planta, já que ambos os gases utilizam a mesma rota de difusão na planta.

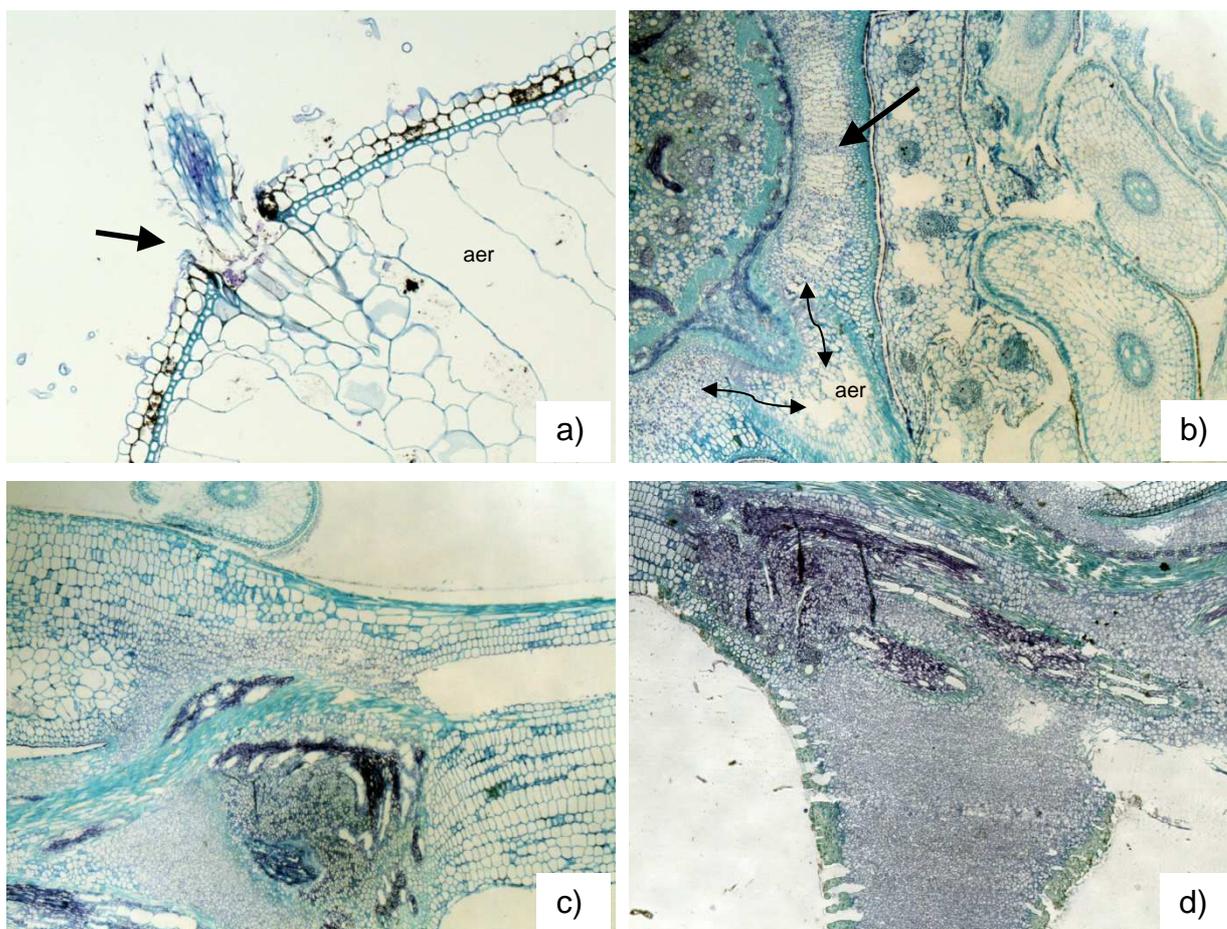


Figura 20 - Imagem da raiz e da região nodal do arroz; a) Seção transversal do corte de uma raiz adventícia secundária mostrando o surgimento de uma nova raiz (aumento de 200x); b) Imagem da secção transversal da região da coroa da planta detalhando a zona de transição do caule e do sistema radicular (aumento de 40x); c) Secção longitudinal da região da nodal da planta de arroz demonstrando o acesso do córtex do caule até a bainha da folha(aumento de 40x); d) Secção longitudinal da região nodal interligando as cavidades medulares de dois entrenós (aumento de 40x); aer = aerênquima.

Na coroa do arroz existem vários nós não alongados. A presença de uma extensa camada de células parenquimáticas frouxas, com grandes espaços apoplásticos indica um caminho livre a difusão de gases (Figura 20b e Figura 20c), embora Butterbach-bahl; Papen e Rennenberg (1997) e Aulakh et al. (2000c) sugerem que as cultivares diferenciam-se na capacidade de efluxo de  $\text{CH}_4$  em função da existência de uma barreira estrutural a difusão de gases, na interseção entre o sistema radicular e o caule do arroz. Apesar de não existir aerênquimas do

tipo esquizógeno ou lisígeno nesta interseção, a presença de células grandes frouxas com grandes espaços apoplásticos visíveis (Figura 20b) demonstram que há ligação direta do córtex da raiz com o córtex do caule (Figura 20b), uma rota apoplástica de difusão de gases com baixa resistência. Esse mecanismo se iguala ao movimento de gases por uma esponja, onde não ocorre fluxo e sim seu movimento via difusão (BODEGOM et al., 2001). Esse resultado vai ao encontro de Kluzde; DeLaune e Patrick (1993) que avaliaram a difusão de gases na planta de arroz e não indicaram à existência de barreiras que aumentem a resistência dos gases no arroz.

O córtex da região do entrenó apresenta aerênquimas esquizógenos bem desenvolvidos, formando uma rota eficiente de transporte de gases. Os entrenós alongados apresentam no colmo células isodiamétricas compactas, formando um canal de resistência a difusão apoplástica de  $\text{CH}_4$ . No entanto, todos os entrenós não alongados apresentaram grandes aerênquimas (Figura 21a). Os entrenós alongados próximos a inserção da folha bandeira, a seção transversal do caule não apresentou a formação de aerênquimas, independente das cultivares avaliadas (Figura 21b).

A passagem do  $\text{CH}_4$  dos entrenós até a bainha da folha também é relatada na literatura como pontos de limitação a difusão de  $\text{CH}_4$  (AULAKH et al., 2000c). Esse caminho é importante devido a presença de grande número de estômatos localizados na folha, mas que permite a saída do  $\text{CH}_4$  do interior da planta para o ambiente. Na Figura 20c, nota-se que esta interseção não é acompanhada do desenvolvimento de aerênquimas. Por outro lado, o caminho apoplástico é pequeno, chegando a apenas alguns milímetros (Figura 20c). As células do córtex da região do entrenó mostram um *continuum* com as células próximas da epiderme da bainha da folha, que estão frouxas em contato com os grandes aerênquimas da bainha da folha (Figura 20c). Mais ao centro, logo no início da bainha da folha, uma camada de células pequenas e aparentemente mais densas (Figura 20d). Estas células são células braciiformes apresentando um tecido frouxo, que possibilita a baixa resistência a difusão de gases, facilitando o acesso do  $\text{CH}_4$  do córtex do caule até a bainha da folha (Figura 20d).

A cavidade medular tem sido relatada como um local em que ocorre uma alta concentração de  $\text{CH}_4$ . Nouchi; Mariko e Aoki (1990) encontraram valores de  $\text{CH}_4$  de 2900 vezes a concentração de  $\text{CH}_4$  no ambiente atmosférico. Como a região nodal

apresenta grande espaço apoplástico permitindo a difusão de gases, esta cavidade provavelmente deva estar em equilíbrio de concentração de gases com o meio apoplástico. A disposição das células é frouxa, o que tende ao equilíbrio da concentração de gases na região do entrenó, independente da posição da planta (Figura 20d).

Uma vez que o  $\text{CH}_4$  está na bainha da folha, facilmente atinge a atmosfera (Figura 21d). A camada de células que separa o aerênquima dos estômatos varia com a posição do corte na planta. O número de células na região próxima ao caule é menor do que na região próxima a inserção da lâmina da folha. Próximo ao caule o número de camadas de células da face adaxial pode variar de apenas 1 camada de células (Figura 21c) até em torno de 5 camadas de células (Figura 21d) na região próxima a inserção da folha. Na face abaxial, o número de camadas de células são menores, variando de 1 a 3 camadas. Em ambas as situações, a epiderme é formada por uma camada de células compactas e esclerificadas, o que não permite a difusão de  $\text{CH}_4$  ao ambiente. Nouchi; Mariko e Aoki (1990) afirmaram que grande parte do  $\text{CH}_4$  atinge a atmosfera via estruturas na face adaxial da bainha da folha denominada de microporos. No entanto, Groot et al. (2005) não encontraram que estas estruturas sejam importantes à saída do  $\text{CH}_4$  da planta. A alta concentração de  $\text{CH}_4$  no meio onde foi realizado o experimento de Nouchi; Mariko e Aoki (1990) pode ter influenciado nos resultados e conclusões. Wang; Neue e Samonte (1997a) encontraram que a saída de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera se dá através dos estômatos. Na bainha da folha, o  $\text{CH}_4$  não atinge a lâmina da mesma para chegar à atmosfera, pois os aerênquimas da bainha são grandes e separados por poucas camadas de células do ambiente (Figura 21d), sendo que sua saída é favorecida via estômatos. Nouchi; Marilo e Aoki (1990) encontraram que a maior parte do efluxo de  $\text{CH}_4$  ocorreu próximo a base da planta. A saída do  $\text{CH}_4$  é facilitada, sendo que o mesmo não necessita atingir a lâmina da folha para atingir o ambiente.

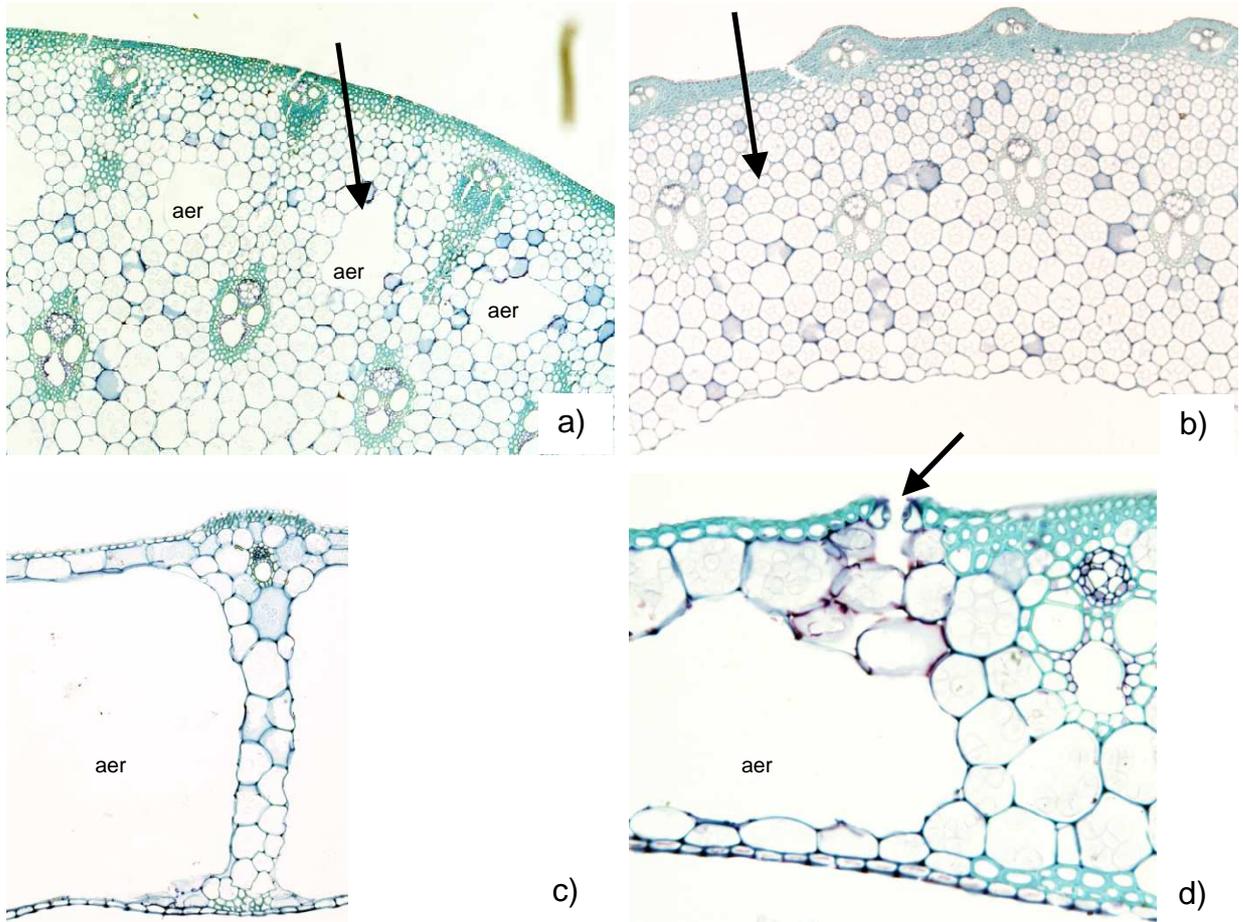


Figura 21 - Imagem do caule e da bainha do arroz; a) Imagem da secção transversal do caule do arroz mostrando os aerênquimas presentes (aumento de 100x); b) Imagem da secção transversal do caule do arroz mostrando a ausência dos aerênquimas (aumento de 100x); c) Imagem da bainha da folha do arroz (aumento de 200x); d) ilustrando um estômato e a saída do  $\text{CH}_4$  para a atmosfera via difusão apoplástica (aumento de 200x).

A avaliação da morfologia interna entre as cultivares utilizadas neste estudo não apresentou diferenças quanto à estrutura da morfologia da folha, do caule, dos nós e das raízes do arroz (dados não apresentados). A condição ambiental do estudo foi a mesma entre as cultivares. Isso possibilitou a formação de um vasto sistema de aerênquimas em todas as cultivares, em função da necessidade de suprir oxigênio as suas raízes. A cultura do arroz é adaptada a esta condição de cultivo por alagamento. Mesmo utilizando cultivares com distintas origens, a cultura do arroz apresenta as mesmas estruturas de suprimento de  $O_2$  das raízes, e que permite afirmar que as diferenças apresentadas no Estudo II Capítulo I ocorrem por uma associação de fatores, incluindo os fisiológicos, ambientais e genéticos não detectados na morfologia interna do arroz.

As estruturas que limitariam o efluxo de  $CH_4$  também limitariam o influxo de  $O_2$ . Do ponto de vista fisiológico, a restrição de oxigênio no sistema radicular irá afetar a fisiologia da planta, com efeito no potencial produtivo. Isso indica que dificilmente tem-se cultivares com limitações estruturais a difusão de oxigênio. Estudos de modelagem na condutância de gases na planta, associados a fatores ambientais e genéricos, podem melhorar a compreensão dos fatores relacionados a planta que irão contribuir para a mitigação do efluxo de  $CH_4$  pela cultura do arroz.

Nesta perspectiva apresenta-se uma proposta de adaptação da rota de transporte de  $CH_4$  elaborada por Nouchi, Mariko e Aoki (1990) e Aulakh et al., (2000c) apresentada na Figura 22.

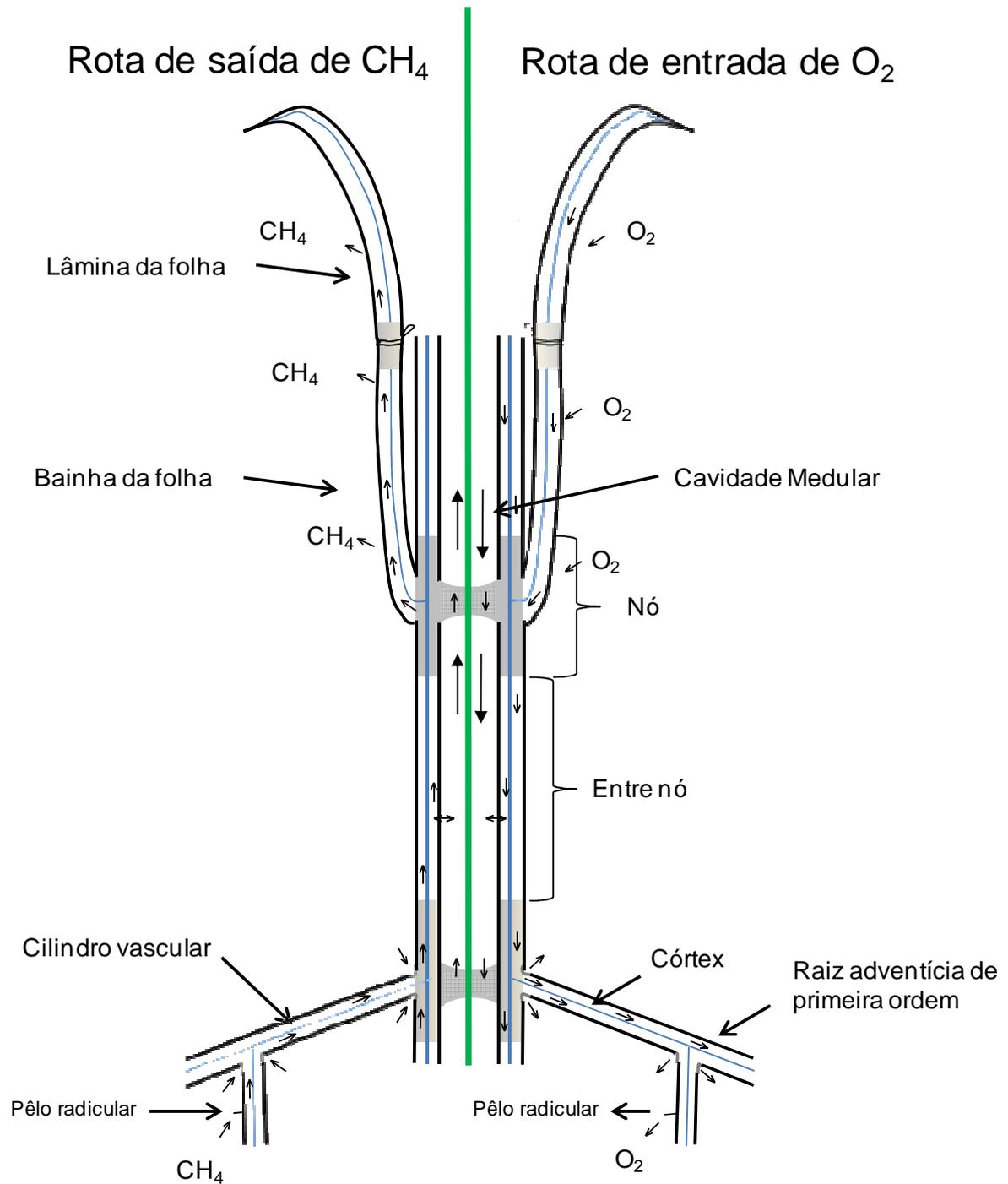


Figura 22 - Rota de transporte de  $\text{CH}_4$  da rizosfera do arroz até o ambiente atmosférico. (adaptado de NOUCHI; MARIKO; AOKI, 1990 e AULAKH et al., 2000)

A entrada do  $\text{CH}_4$  na planta ocorre preferencialmente via mecanismo de absorção de água no arroz. Ao atingir o córtex da raiz do arroz, o  $\text{CH}_4$  se gaseifica neste órgão e por difusão atinge a região nodal. Essa estrutura é semelhante a uma esponja, onde o  $\text{CH}_4$  do córtex da raiz se difunde até o nó em função de um gradiente de concentração formado entre o espaço apoplástico do caule com o

aerênquima da raiz (Figura 22). A difusão via apoplástica atinge os aerênquimas do caule (Figura 22). No caule, o  $\text{CH}_4$  no apoplasto entra em equilíbrio com o  $\text{CH}_4$  presente na cavidade medular (Figura 22). Os nós do caule não apresentam continuidade com os aerênquimas do mesmo, sendo que a passagem do  $\text{CH}_4$  novamente ocorre por rotas apoplásticas. Essa passagem é favorecida pela disposição das células do córtex, que são frouxas, permitindo a difusão de gases. A difusão nestas células ocorre em direção aos aerênquimas da bainha da folha (Figura 22). Ao atingir a bainha, o  $\text{CH}_4$  facilmente atinge os estômatos, pois apenas uma barreira de células frouxas, que varia de 1 até 5 camadas de células, o separa da câmara estomática, atingindo o ambiente externo. Estas células são grandes isodiamétricas e frouxas, apresentando um “canal” aberto para a saída do  $\text{CH}_4$  para atmosfera. O  $\text{CH}_4$  poderá atingir a lâmina da folha, e novamente, via estômatos atingir a atmosfera. Assim, características relacionadas com estatura das plantas e produção de matéria seca (Capítulo I do Estudo II) podem explicar a maior emissão de metano de cultivares por efeito de uma maior número de canais e/ou superfícies expostas que permitem a difusão do  $\text{CH}_4$ .

#### **4.2.3 CONCLUSÕES**

A planta de arroz apresenta uma seqüência contínua de aerênquimas em sua estrutura morfológica.

As zonas em que não ocorrem os aerênquimas apresentam células frouxas com grandes espaços apoplásticos, mantendo uma continuidade de difusão de gases pela planta, sem restrições.

As cultivares de arroz avaliadas não apresentaram diferenças morfológicas significativas que podem limitar a difusão de gases pela planta.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cultivo de arroz tem sido apontado como um grande poluente, por ser cultivado em áreas de várzeas, poluindo o ar e a água. Nas condições não antropizadas, as várzeas estão saturadas com água durante boa parte do ano, o que pode provocar efluxos  $\text{CH}_4$  para a atmosfera (efluxo natural de  $\text{CH}_4$  para o ambiente). As áreas de cultivo de arroz são drenadas para fins de colheita, manejo de plantas de cobertura, preparo do solo e plantio. Seu alagamento ocorre apenas na estação de cultivo, contribuindo com altos efluxos de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera. Estudos devem ser realizados para avaliar os efluxos anuais de  $\text{CH}_4$  em ambas as condições, a fim de determinar o efluxo antrópico de  $\text{CH}_4$  nas áreas de cultivo do arroz em várzeas. A possibilidade de utilizar um sistema de manejo de solo que proporcione um baixo efluxo de  $\text{CH}_4$ , mantendo altas as produtividades, pode permitir que esta cultura seja aceita como ambientalmente sustentável, produzindo alimentos com menor impacto ambiental.

A utilização do manejo intermitente da irrigação com o realagamento do solo ainda saturado é uma alternativa viável de produzir arroz mitigando gases de efeito estufa, podendo ainda aumentar a eficiência do uso da água. De maneira geral, esse sistema permitiu diminuir em 70% os efluxos de  $\text{CH}_4$  sem prejuízos a produtividade do arroz. O sucesso deste sistema no campo irá depender das condições de cultivo em cada lavoura. O conceito de irrigação intermitente preconiza que o realagamento deverá ocorrer quando a primeira coroa de uma planta de arroz da lavoura estiver descoberta com água. Em lavouras não sistematizadas, este ponto de controle leva a equívocos, pois grande parte da lavoura ainda estará totalmente coberta com uma lâmina de água. Uma vez o solo saturado, o agricultor dispõe de pouco tempo até que o solo seja oxidado. A entrada de  $\text{O}_2$  neste período irá promover a nitrificação do  $\text{NH}_4^+$  no solo, e o realagamento irá causar grandes perdas de N na forma de  $\text{N}_2\text{O}$ , causando efeito negativo na produtividade do arroz. Por isso, o alagamento deverá ser o mais rápido possível afim de o agricultor não ter prejuízos com a produtividade do arroz e causar o efluxo de outro gás de efeito estufa o  $\text{N}_2\text{O}$ .

O Eh do solo é resultado dos processos microbiológicos do solo envolvendo reações redox e não o fator que controla o processo de redução do solo. Por este motivo, este índice é ótimo para se verificar a situação dos processos envolvidos na

redução dos solos. Os sistemas de irrigação intermitentes apresentaram variações de pH, Eh e, conseqüentemente, no teor de nutrientes na solução do solo ao longo do ciclo, enquanto no sistema contínuo os valores foram mais estáveis. No entanto, este sistema apresentou um maior índice de redução do solo, o que em determinadas condições poderão causar efeitos deletérios à produção do arroz, como toxidez por  $\text{Fe}^{+3}$  e ou ácidos orgânicos. Além disso, esse sistema apresentou um menor índice de eficiência no uso da água, demonstrando que sistemas alternativos de irrigação podem substituir o sistema tradicional de irrigação adotado no RS e SC.

A forma de manejar a intermitência do arroz é um dos fatores responsáveis por manter altas produções de arroz, alta eficiência no uso da água e diminuir a intensidade de redução do solo e evitar o efluxo de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ . A ausência da lâmina de água, sem permitir a completa drenagem permite uma difusão parcial do oxigênio no solo, mantendo as características desejáveis do alagamento do solo, mas evitando que a redução seja acentuada, mantendo produtividades máximas do arroz. A definição de valores de Eh crítico para se realizar o realagamento do solo não é viável para uma gama de tipos de solos, uma vez que isso irá depender da disponibilidade de íons eletroceptores que irão competir com as bactérias metanogênicas por substratos para a produção de  $\text{CH}_4$ . No entanto, um significado prático e aplicável para que o manejo da irrigação seja adotado, sem prejuízos a cultura é que o realagamento do solo deve ser realizado com o solo ainda saturado.

As cultivares de menor porte e alta capacidade de produção foram as cultivares mais eficientes em produzir arroz com menor impacto ambiental. Estas características foram associadas às cultivares do tipo moderno filipino e cultivares híbridas. Cultivares como Arize 1003, Avaxi CI, BRS Atalanta, BRS Querência, BRS Taim, Inov CI, Irga 422 e Irga 424 são cultivares potencialmente mitigadoras do efluxo de  $\text{CH}_4$ . Elas apresentam como características comuns a baixa estatura, ciclo igual ou inferior a 114 dias e todas são do tipo moderno-filipino ou híbridas. Embora a dinâmica de efluxo de  $\text{CH}_4$  entre as cultivares foram semelhantes, existem diferenças no potencial de efluxo de  $\text{CH}_4$  entre cultivares de arroz irrigado por alagamento. No entanto, a avaliação da morfologia interna entre as cultivares utilizadas neste estudo não apresentou diferenças quando a estrutura da morfologia da folha, do caule, dos nós e das raízes do arroz. A condição ambiental do estudo foi a mesma entre as cultivares, isso possibilitou a formação de aerênquimas em todas

as cultivares, em função da necessidade de suprir oxigênio as suas raízes. Mesmo apresentando distintas origens, as cultivares apresentaram as mesmas estruturas, o que nos permite afirmar que as diferenças no efluxo de  $\text{CH}_4$  ocorrem em função de uma associação de fatores, incluindo os fisiológicos, ambientais e genéticos, não demonstrados em sua morfologia.

As estruturas que irão limitar o efluxo de  $\text{CH}_4$  também irão limitar o influxo de  $\text{O}_2$ . Do ponto de vista fisiológico, a restrição de oxigênio no sistema radicular irá afetar a fisiologia da planta, com efeito no potencial produtivo. Isso indica que dificilmente teremos cultivares com limitações estruturais a difusão de oxigênio. Estudos de modelagem nos parâmetros fisiológicos da planta, associados a fatores ambientais, podem melhorar a compreensão dos fatores relacionados a planta que irão contribuir para a mitigação do efluxo de  $\text{CH}_4$  pela cultura do arroz.

## 5 REFERÊNCIAS

ACHTNICH, C.; BAK, F.; CONRAD, R. Competition for electron donors among nitrate reducers, ferric iron reducers, sulfate reducers, and methanogens in anoxic paddy soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 19, n. 1, p. 65-72, 1995.

AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; BALBINOT, Jr, A. A. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 32, n. 6, p. 1073-1081, 2002.

ANDRES, A. et al. **Estratégia para o aumento da eficiência de uso da água pelo arroz: sistema de irrigação por inundação intermitente**. Embrapa Clima Temperado, Pelotas: 2009. 2 p. (Documento, 110)

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. Tradução: Ricardo Bicca de Alencastro. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

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**, v. 58, p. 357-366, 2000a.

AULAKH, M. S.; BODENBENDER, J.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H. Methane transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 58, p. 367-375, 2000b.

AULAKH, M. S.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H.; FINK, S. Pattern and amount of aerenchyma relate to variable methane transport capacity of different rice cultivars. **Plant Biology**, v. 2, p. 182-194, 2000c.

AULAKH, M. S.; WASSMANN, R.; BUENO, C.; RENNENBERG, H. Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil. **Plant and Soil**, v. 230, p. 77-86, 2001.

AULAKH, M. S.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H. Methane transport capacity of twenty-two rice cultivars from five major Asian rice-growing countries Agriculture. **Ecosystems and Environment**, v. 91, p. 59-71, 2002.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. Tradução: RECEIO, A. M. L.; CARRERA, L. C. M., 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BELTRAME, L. S.; LOUZADA, J. A. Water use rationalization in rice irrigation by flooding. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON EFFICIENT WATER USE, 1.; 1991, Cidade do México. **Anais...** Cidade do México: IWRA, 1991. p. 337-345.

BHARATI, K.; MOHANTY, S. R.; RAO, V. R.; ADHYA, T. K. Influence of flooded and non-flooded conditions on methane efflux from two soils planted to rice. **Chemosphere**, v. 3, p. 25-32, 2001.

BODEGOM, P. V.; GOUDRIAAN, J.; LEFFELAAR, P. A mechanistic model on methane oxidation in a rice rhizosphere, **Biogeochemistry**, v. 55, p. 145–177, 2001.

BODEGOM, P. V.; STAMA, F.; MOLLEMA, L.; BOEKE, S.; LEFFELAAR, P. Methane oxidation and the competition for oxygen in the rice rhizosphere. **Applied and environmental microbiology**, v. 67, n. 8, p. 3586-3597, 2001.

BORRELL, A.; GARSIDE, A.; FUKAI, S. Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. **Field Crops Research**, v. 52, p. 231-248, 1997.

BORTOLON, L. ; SOUSA, R. O. ; OLIVEIRA, E. S. Toxidez por ácidos orgânicos em genótipos de arroz irrigado. **Scientia Agraria**, v. 10, p. 81-84, 2009.

BOSSE, U.; FRENZEL, P. Activity and distribution of CH<sub>4</sub>-oxidizing bacteria in flooded rice microcosms and in rice plants (*Oryza sativa*). **Applied and Environmental Microbiology**, v. 63, p. 1199-1207, 1997.

BOUMAN, B. A. M. Water-efficient management strategies in rice production. **International Rice Research Notes**, v. 16, n. 2, p. 17-22, 2001.

BOUMAN, B. A. M.; HENGSDIJK, H.; HARDY, B.; BINDRABAN, P. S.; TUONG, T. P.; LADHA, J. K. **Water-wise rice production**. Los Baños, Philippines, IRRI. 2002. 356 p.

BOUMAN, B. A. M.; LAMPAYAN, R. M.; TUONG, T. P. **Water management in irrigated rice: coping with water scarcity**. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute. 2007. 54 p.

BOUMAN, B. A. M.; TUONG, T. P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. **Agricultural Water Management**, v. 49, p. 11-30, 2001.

BRITZKE, D., SILVA, L. S. da, MORO, V. J., BUNDT, A. C., ÁVILA, L. A., BAYER, C., ZSCHORNACK, T.; MARCHEZAN, E. Emissão de metano em arroz cultivado por alagamento com irrigação contínua e intermitente. In: FERTBIO 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: SBCS, 2008.

BUTTERBACH-BAHL, K.; PAPEN, H.; RENNENBERG, H. Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields. **Plant Cell Environmental**, v. 20, p. 1175-1183, 1997.

BUTTERBACH-BAHL, K.; PAPEN, H.; RENNENBERG, H. Scanning electron microscopy analysis of the aerenchyma in two rice cultivars. **Phyton**, v. 40, n. 1, p. 43-55, 2000.

CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K.; MINAMI, K. Methane and nitrous oxide emissions from paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. **Plant and Soil**, v.196, p. 7-14, 1997.

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciencia Rural**, v. 29, n. 1. p. 171-179, 1999.

CEPTEC – CENTRO DE PREVENÇÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, **El niño e La niña**. disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 25 julho de 2011.

CHIDTHAISONG, A.; OBATA, H.; WATANABE, I. Methane formation and substrate utilization in anaerobic rice soils as affected by fertilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 135-143, 1999.

COLMER, T. D. Long-distance transport of gases in plants: A perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. **Plant Cell Environmental**, v. 26, p. 17-36, 2003.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400 p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (2009). **Acompanhamento da safra brasileira**. Disponível em [http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3graos\\_08.09.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3graos_08.09.pdf). Acesso em: 12 de janeiro de 2009.

CONRAD, R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases. **Microbiological Reviews**, v. 60, n. 4, p. 609–640, 1996.

CONRAD, R. Control of microbial methane production in wetland rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 64, p. 59-69, 2002.

CONRAD, R.; KLOSE, M. Anaerobic conversion of carbon dioxide to methane, acetate and propionate on washed rice roots. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 30, p. 147-155, 1999.

CORRÊA, N. I.; CAICEDO, N. L.; FEDDES, R.; LOUZADA, J. A. S.; BELTRAME, L. F. Consumo de água na irrigação do arroz por inundação. **Lavoura Arrozeira**, v. 50, n. 432, p. 3-8, 1997.

COSTA, F. S. **Estoques de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtropico brasileiro**. 2005. 129f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; LIMA, M. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. Variação diária da emissão de metano em solo cultivado com arroz irrigado no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 38, n. 7, p. 2049-2053, 2008.

CRUZ, R. P. **Exigências climáticas para a cultura do arroz irrigado**. Cachoeirinha: Irga, 2010. 38 p. (Boletim Técnico, 11)

DANNENBERG, S.; CONRAD, R. Effect of rice plants on methane production and rhizospheric metabolism in paddy soil. **Biogeochemistry**, v. 45, p. 53-71, 1999.

DAS, K.; BARUAH, K. K. Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (*Oryza sativa*) plant. **Physiologia Plantarum**, v. 134, p. 303-312, 2008.

DENIER Van der Gon, H. A. C.; BREEMEN, N. Van. Diffusion-controlled transport of methane from soil to atmosphere as mediated by rice plants. **Biogeochemistry**, v. 21, p.177-190,1993.

DENIER Van der Gon, H. A. C.; NEUE, H. U. Oxidation of methane in the rhizosphere of rice plant. **Biology and Fertility of Soils**, v. 22, p. 359-366, 1996.

DUBEY, S. K. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: a review. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 3, n. 2, p.1-27, 2005.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA/CNPS, 2006. 412 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**. Relatório de Referência. Emissões de Metano da Pecuária. Ministério da Ciência e Tecnologia: Brasília, 2002.

ESSINGTON, M. E. **Soil and Water Chemistry, an Integrative Approach**. CRC Press, Boca Raton: 2005. 534 p.

EVANS, D. E. Aerenchyma formation. **New Phytologist**, v. 161, p. 35-49, 2003.

GOGOI, N.; BARUAH, K. K.; GOGOI, B.; GUPTA, P. K. Methane emission characteristics and its relations with plant and soil parameters under irrigated Rice ecosystem of northeast India. **Chemosphere**, v. 59, p. 1677-1684, 2005.

GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F. S.; PICCOLO, M. C.; VIEIRA, F. C. B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emission as affected by long term tillage, crop rotations and fertilization in a subtropical environment. **Soil Tillage Research**, v. 101, n. 1, p. 36-44, 2009.

GRIEBELER, G., SILVA, L. S., POCOJESKI, E., PRADO, G. R., BAYER, C.; ZSCHORNACK, T. Emissão de metano em solos de várzea do Rio Grande do Sul. In: FERTBIO 2008, Londrina. **Anais...** Londrina:SBCS, 2008.

GROOT, T. T.; Van BODEGOM, P. M.; MEIJER, H. A. J.; HARREN, F. J. M. Gas transport through the root-shoot transition zone of rice tillers. **Plant and Soil**, v. 277, p.107–116, 2005.

HOU, A. X.; CHEN, G. X.; WANG, Z. P.; VAN CLEEMPUT, O.; PATRICK Jr., 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, p. 2180-2186, 2000.

HUANG, Y.; JIAO, Y.; ZONG, L. G.; ZHENG, X. H.; SASS, R. L.; FISHER, F. M. Quantitative dependence of methane emission on soil properties. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 64, p. 157-167, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change 2007: **The Physical Science Basis**: Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva: Switzerland, 2007.

ITOH, M. Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage Agriculture. **Ecosystems and Environment**, v. 141, p. 359-372, 2011.

JOABSSON, A.; CHRISTENSEN, T. R. Methane emissions from wetlands and their relationship with vascular plants: an Arctic example. **Global Change Biology**, v. 7, p. 919-932, 2001.

JOHNSON-BEEBOUT, S. E., ANGELES, O. R., ALBERTO, M. C. R.; BURESH, R.J. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants. **Geoderma**, v.149, p.45-53, 2009.

JUSTIN, S.; ARMSTRONG, W. Evidence for the involvement of ethene in aerenchyma formation in adventitious roots of rice (*Oryza sativa*). **New Phytologist**, v.118, p.49-62, 1991.

KAO-KNIFFIN, J.; FREYREB, D. S.; BALSERA, T. C. Methane dynamics across wetland plant species. **Aquatic Botany**, v. 93, p. 107-113, 2010.

KLUDZE, H. K.; DeLAUNE, R. D.; PATRICK Jr., W. H. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 386-391, 1993.

Le MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal Soil Biology**, v. 37, p. 25-50, 2001.

LIMA, M. A.; VILELLA, O. V.; FRIGHETTO, R. T. S.; PARAIBA, L. C. Influence of continuous and intermittent water regime on methane emission from irrigated rice crops in the Southeast of Brazil. In: **The Third International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference**, 2003, Beijing. Proceedings of The Third International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference. Beijing: China Coal Information Institute, 1:17-21, 2003.

LIMA, M. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; LIGO, M. A. V. **Primeiro inventario brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Relatórios de referência – Emissões de metano da pecuária**. Brasília: IBGE-EMBRAPA – MCT, 2002. 79p.

LINDAU, C. W.; BOLLICH, P. K. Methane emissions from Louisiana 1st and ratoon crop rice. **Soil Science**, v. 156, n. 1, p. 42-48, 1993.

LINDAU, C. W.; BOLLICH, P. K. e DeLAUNE, R. D. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 54, p. 109-114, 1995.

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, p. 906-913, 2010.

MACHADO, S. L. de O.; MARCHEZAN, E.; RIGHES, A. A.; CARLESSO, R.; VILLA, S. C. C.; CAMARGO, E. R. Consumo de água e perdas de nutrientes e de sedimentos na água de drenagem inicial do arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, 2006.

MAGALHÃES JR. A. M. de; TERRES, A. L.; FAGUNDES, P. R.; FRANCO, D. F.; ANDRES, A. Aspectos genéticos, morfológicos e de desenvolvimento de plantas de arroz irrigado. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JR. de, A. M. (Ed.). **Arroz Irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. p.143-160.

MARCHESAN, E. Características de cultivares de arroz irrigado. 1. ed. Santa Maria: 2006. 94 p.

MARTINI, L. F. D. **transporte de agrotóxicos e uso de água em diferentes manejos de irrigação de arroz**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MCT, 2009. **Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Informações Gerais e Valores Preliminares, Brasília, 24 de novembro de 2009 (24 de novembro de 2009).

METCALFE, C. R. **Anatomy of the Monocotyledons**. Clarendon Press, Oxford. 1960. 389 p.

MEZZOMO, R. **Irrigação contínua e intermitente em arroz irrigado: uso de água, eficiência agrônômica e dissipação de imazethapyr, imazapic e fipronil**. 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MINAMI, K.; YAGI, K. Mitigation of methane emissions from rice cultivation. **Global Environmental Research**, v. 2, p. 15-19, 1998.

MINAMIKAWA, K.; SAKAI, N. The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy soils in Japan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 107, p. 397-407, 2005.

MINAMIKAWA, K.; SAKAI, N. The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emission from a paddy field in Japan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 116, p. 181-188, 2006.

MISHRA, S.; RATH, A. K. · ADHYA, T. K. · RAO, V. R.; SETHUNATHAN, N. Effect of continuous and alternate water regimes on methane efflux from rice under greenhouse conditions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 24, p. 399-405, 1997.

MITRA, S.; JAIN, M. C.; KUMAR, S.; BANDYOPADHYAY, S. K.; KALRA, N. Effect of rice cultivars on methane emission. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 73, p.177-183, 1999.

MOREIRA, F. M. de S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

MOSIER, A. R. Chamber and isotopic techniques. In: ANDREAE, M. O.; SCHIMEL, D. S. **Exchange of traces gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere**: report of the Dahlem Workshop. Berlin: John Wiley & Sons, 1989. p.175-187.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chemica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.

NEUE, H. U.; WASSMANN, R.; KLUDZE, H. K.; BU, J.; LANTIN, R. S. Factors and processes controlling methane emission from rice fields. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v. 49, p. 111-117, 1997.

NEUE, H. U.; SASS, R. **Trace gas emissions from rice fields**. In: Global Atmospheric-Biospheric Chemistry, PRINN, R. G. (ed.) Environmental Science Research, 1994.

NOUCHI, I.; MARIKO, S.; AOKI, K. Mechanism of Methane Transport from the Rhizosphere to the Atmosphere through Rice Plants. **Plant Physiology**, v. 94, p. 59-66, 1990.

NUGROHO, S. G.; SUNYOTO, LUMBANRAJA, J.; SUPRAPTO, H.; ARDJASA, W. S.; KIMURA, M. Effect of rice variety on methane emission from an Indonesian paddy field. **Soil Science & Plant Nutrition**, v. 43, p. 799-809, 1997.

OHLSSON, T. Redox reactions in soils sequence of redox reactions in a waterlogged soil. **Nordic Hydrology**, v. 10, p. 89-98, 1979.

PETERS, V.; CONRAD, R. Sequential reduction processes and initiation of CH<sub>4</sub> production upon flooding of oxic upland soils. **Soil Biology & Biochemistry**. v. 28, p. 371-382, 1996.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemical of submerged soils. **Advances in Agronomy**. v. 24, p. 29-96. 1972.

ROY, R.; KLÜBER, H. D.; CONRAD, R. Early initiation of methane production in anoxic rice soil despite the presence of oxidants. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 24, p. 311-320, 1997.

SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K., STONE, L. F.; SANTOS, C. Manejo de água e de fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 565-573, 1999.

SASS, R. L.; FISHER, F. M.; WANG, Y. B.; TURNER, F. T.; JUND, M. F. Methane emission from rice fields: The effect of flood water management. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 6, p. 249-262, 1992.

SETYANTO, P.; BAKAR, R. A. Methane emission from paddy fields as influenced by different water regimes in central Java. **Indonesian Journal Agricultural Science**, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2005.

SETYANTO, P.; ROSENANI, A. B.; MAKARIM, A. K.; FAUZIAH, C.I.; BIDIN, A.; SUHARSIH. Soil controlling factors of methane gas production from flooded rice fields in Pati District, Central Java. **Indonesian Journal Agricultural Science**, v. 3, n. 1 p. 20-31, 2002.

SILVA, L. S.; BOHNEN, H. Rendimento e acúmulo de nutrientes pelo arroz em solução nutritiva com e sem adição de sílcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 771-777, 2001.

SILVA, L. S.; GRIEBELER, G.; MOTERLE, D. F.; BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; POCOJESKI, E. Dinâmica da emissão de CH<sub>4</sub> em solos representativos do cultivo de arroz irrigado no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 473-483, 2011.

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes alagados. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F.A.O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, v. 1, p. 525-543.

SINGH, S., SINGH, J. S.; KASHYAP, A. K. Contrasting Pattern of Methane Flux in Rice Agriculture. **Naturwissenschaften**, v. 85, p. 494-497, 1998.

SINGH, S.; KASHYAP, A. K.; SINGH, J. S. Methane flux in relation to growth and phenology of a high yielding rice variety as affected by fertilization. **Plant and Soil**, v. 201, p. 157-164, 1998.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z., et al., Agriculture. In **Climate Change 2007: Mitigation**. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI). **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil.** Porto Alegre: SOSBAI. 2010. 188 p.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI). **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil.** Pelotas: SOSBAI. 2007. 154 p.

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; et al. Technical Summary. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth, Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

SOUSA, R. O.; GOMES, A. S.; VAHL, L. C. Toxidez por Ferro em Arroz Irrigado. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES Jr. A. (Org.). **Arroz Irrigado no Sul do Brasil.** 1. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, p. 305-337.

SOUSA, R. O.; VAHL, L. C.; OTERO, X. L. Química de Solos Alagados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Org.). **Química e Mineralogia do Solo.** Parte II - Aplicações. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, v. 2, p. 485-528.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 45-74.

STONE, L. F. **Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 48 p. (Documentos, 176)

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia do estresse. In: **Fisiologia Vegetal.** 4. ed. Porto Alegre, 2009, p. 738-774.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos - UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, nº 5)

TERRES, A. L. S.; FAGUNDES, P. R. R.; MACHADO, M. O.; MAGALHÃES JR., A. M.; NUNES, C. D. M. Melhoramento genético e cultivares de arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JR., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: 2004. p.161-235.

TOWPRAYOON, S.; SMAKGAHN, K.; POONKAEW, S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. **Chemosphere**, v. 59, 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, p. 1085-1090, 2010.

VAHL, L. C.; SOUSA, R. O. Aspectos físico-químicos de solos alagados. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr, A. M. (eds) **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, Embrapa, 2004. p. 97-118

Van BODEGOM, P. M.; GROOT, T.; van den HOUT, P. A.; LEFFELAAR, P. A.; GOUDRIAAN, J. Diffusive gas transport through flooded Rice systems. *Journal of geophysical research*, v. 106, p. 20,861-20,873, 2001.

WANG, B.; NEUE, H. U.; SAMONTE, H. P. Effect of cultivar difference (“IR72”, “IR65598” and “DULAR”) on methane emission. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 62, n. 1, p. 31-40, 1997a.

WANG, B.; NEUE, H. U.; SAMONTE, H. P. Factors controlling diel patterns of methane emission via rice. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 53, n. 3, p. 229-235, 1999.

WANG, B.; NEUE, H. U.; SAMONTE, H. P. Role of rice in mediating methane emission. **Plant Soil**, v. 189, p. 107–115, 1997b.

WANG, Z. P.; DELAUNE, R. D.; PATRICK, W. H.; MASSCHELEYN, P. H. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice. **Soil Science Society American Journal**, v. 57, p. 382-385, 1993a.

WANG, Z. P.; LINDAU, C. W.; DELAUNE, R. D.; PATRICK, W. H. Methane emission and entrapment in flooded rice soils as affected by soil properties. **Biology and Fertility of Soils**, v. 16, p. 163-168, 1993b.

WANG, Z. Y.; XU, Y. C.; LI, Z.; GUO, Y. X.; WASSMANN, R.; NEUE, H. U.; LANTIN, R. S.; BUENDIA, L. V.; DING, Y. P.; WANG, Z. Z. Methane emissions from irrigated rice fields in northern China (Beijing). **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v. 58, n. 1-3, p. 55-63, 2000.

WASSMANN, R.; AULAKH, M. S. The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 31, p. 20-29, 2000.

WASSMANN, R.; NEUE, H. U.; BUENO, C.; LANTIN, R. S.; ALBERTO, M. C. R.; BUENDIA, L. V.; BRONSON, K.; PAPEN, H.; RENNENBERG, H. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates. **Plant and Soil**, v. 203, p. 227-237, 1998.

WASSMANN, R.; NEUE, H. U.; LANTIN, R. S.; BUENDIA, L. V.; RENNENBERG, H. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. I. Comparison among field sites in five countries. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v. 58, p. 1-12, 2000.

WATANABE, I.; TAKADA, G.; HASHIMOTO, T.; INUBUSHI, K. Evaluation of alternative substrates for determining methane oxidizing activities and population of soils. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 20, p. 101-106, 1995.

YAN, X.; AKIYAMA, H.; YAGI, K.; AKIMOTO, H. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. **Global Biogeochemical Cycles**, GB2002, v. 23, p. 1-15, 2009.

YANG, S. S.; CHANG, H. L. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 69, n. 1, p.69-80, 1998.

YAO, H.; CONRAD, R. Thermodynamics of methane production in different rice paddy soils from China, the Philippines and Italy. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 463-473, 1999.

YAO, H.; YAGI, K.; NOUCHI, I. Importance of physical plant properties on methane transport through several rice cultivars. **Plant and Soil**, v. 222, p. 83-93, 2000.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Manila, The International Rice Research Institute, 1981. 269 p.

YU, K.; PATRICK, W.H. Jr. Redox Window with Minimum Global Warming Potential Contribution from Rice Soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 68, p. 2086-2091, 2004.

ZHANG, G.; ZHANG, X.; MA, J.; XU, H.; CAI, Z. Effect of drainage in the fallow season on reduction of CH<sub>4</sub> production and emission from permanently flooded rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 1, p.81-91, 2011.

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. 89 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## 6 APÊNDICES

a)



b)



c)



d)



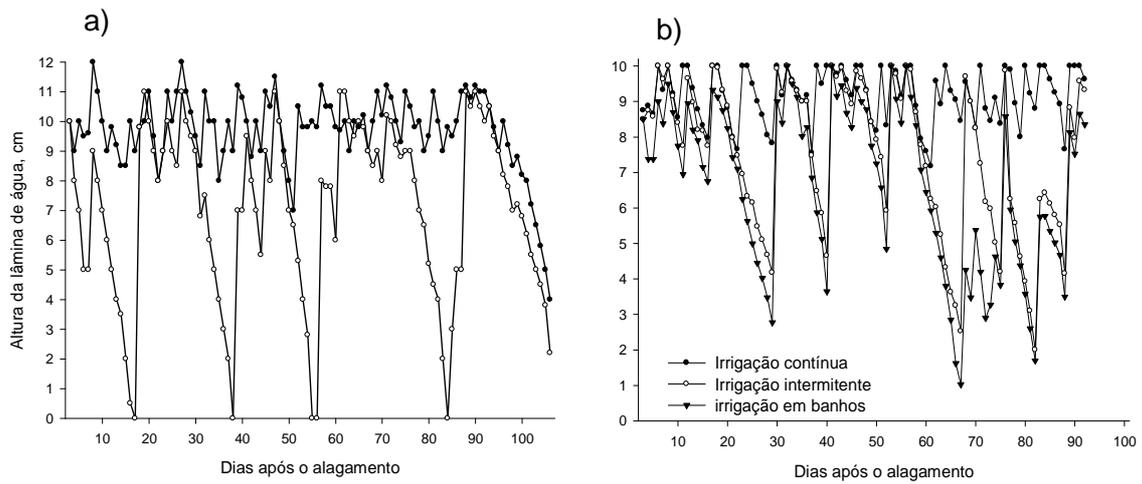
e)



f)



Apêndice 1 - Ilustrações da coleta de  $\text{CH}_4$  realizado no experimento a campo nos anos 2007/2008 e 2009/2010. a) Coletores de  $\text{CH}_4$  durante o momento da coleta; b) Coleta da solução do solo instalado a 10 cm de profundidade; c) Ilustração da coleta de  $\text{CH}_4$ ; d) Leitura dos valores de pH e Eh em sistema “fechado”; e) Acondicionamento das amostras em ambiente resfriado até o momento da análise e f) análise dos gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  por cromatografia gasosa.



Apêndice 2 - Altura da lâmina de água de irrigação do experimento com arroz irrigado no campo em função do manejo de irrigação adotado; a) ano agrícola 2007/2008; b) ano agrícola 2009/2010.

a)



b)



c)



Apêndice 3 - Experimento com o cultivo de arroz em casa de vegetação. a) correção dos atributos químicos do solo; b) instalação dos coletores de solução do solo a 10 cm de profundidade; c) plantio das plântulas.