

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

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



Dissertação

**EMISSÕES DE METANO E DE ÓXIDO NITROSO EM ÁREA DE ARROZ
IRRIGADO INFLUENCIADAS POR SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO**

Jaqueline Trombetta da Silva

Pelotas, 2014

JAQUELINE TROMBETTA DA SILVA

Emissões de metano e de óxido nitroso em área de arroz irrigado
influenciadas por sistemas de preparo do solo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Manejo e Conservação do Solo e da Água).

Orientador: Prof. Dr Rogério Oliveira de Sousa

Co-orientadora: Dr^a. Walkyria Bueno Scivittaro

Pelotas, 2014

JAQUELINE TROMBETTA DA SILVA

Emissões de metano e de óxido nitroso em área de arroz irrigado
influenciadas por sistemas de preparo do solo

Aprovada em 21/02/2014

Banca examinadora:

Professor Dr. Rogério Oliveira de Sousa (Presidente)
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

Professor Dr. Cimélio Bayer
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Profesora Dr^a Flavia Fontana Fernandes
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

DEDICO, aos meus pais, Joacir e
Angela, pelo incentivo,
cuidado e amor.

AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar, motivo da minha fé, por estar comigo em todos os momentos dessa caminhada e por tudo o que me concedeste, em especial por ter me agraciado com pessoas especiais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo. E a Embrapa Clima Temperado, pela bolsa de estudos, no início do curso, pelas oportunidades e concessão da área experimental.

Ao professor Rogério Oliveira de Sousa, pela disponibilidade e apoio de sempre, orientação, amizade, ensinamentos e experiências transmitidas durante o mestrado. E aos demais professores do PPG-MACSA pelos ensinamentos e atenção dedicados a todos os alunos.

À Dr^a Walkyria Bueno Scivittaro, pesquisadora da EMBRAPA Clima Temperado, pela co-orientação, ensinamentos, incentivo e pelo apoio e suporte de sempre. E aos demais pesquisadores, funcionários e estagiários da Embrapa Clima Temperado, que investiram e trabalharam junto neste projeto.

Ao também pesquisador da EMBRAPA Clima Temperado, José Maria Barbat Parfitt, pessoa com uma humildade ímpar, pela recepção, incentivo e apoio inicial.

Ao professor da UFRGS Cimélio Bayer por todo apoio e suporte técnico.

Aos colegas da turma de ingresso, em 2012, no PPG-MACSA, e aos que também foram colegas de aula, assim como colegas de departamento, pelo convívio, companheirismo, estudos e troca de experiências.

Aos bolsistas, Marcelo, Anderson e João, e também aos demais orientados do Prof. Rogério: Gerson, Roberto e Marcos (Pará), pela amizade, convívio e ajuda na execução dos experimentos. E aos funcionários do Departamento de Solos, pela amizade, companheirismo e auxílio técnico.

Aos amigos verdadeiros que o mestrado me proporcionou e também aos que não são do convívio acadêmico, pelo companheirismo e amizade demonstrados, assim como, pelos momentos compartilhados. Em especial, as amigas Jaque, Juliana, Marília e Renata, pelos momentos de descontração e apoio

nessa fase final. Como já dizia Santo Agostinho: “A metade da nossa alma é um bom amigo”.

À minha colega e ex-colegas de apartamento, Tuane, Ana Paula, Alice, Fabiana e Arajara, também amigas, por dividirem um lar comigo, assim como pelo respeito e amizade.

A minha tia e madrinha Simone, um pouco mãe, pela fé transmitida e pelas palavras de incentivo e apoio.

A minha irmã Janaina, pela amizade, cumplicidade, paciência, incentivo, e amor dispensados a mim sempre e ao meu cunhado Francis, pelo apoio. Também ao meu irmão Lucas, pelo apoio, carinho e amor.

Ao meu sobrinho e afilhado Pedro, presente mais verdadeiro e lindo que Deus nos deu, pelos prazerosos momentos de alegria sincera e descontração.

Aos meus pais, Angela e Joacir, pelos ensinamentos de vida passados a mim e também pelo amor e cuidado incondicional, incentivo e confiança depositada. Vocês são exemplos de determinação e luta, sempre pensando no bem de seus filhos. Foram fundamentais! Não tenho palavras para demonstrar minha gratidão.

Às demais pessoas, amigos e familiares e colegas, não citados, que contribuíram de alguma forma nessa caminhada, muito obrigada.

Enfim, são tanto que caminharam comigo durante a realização deste sonho!
A vocês, um sincero muito obrigado!

RESUMO

SILVA, Jaqueline Trombetta. **Emissões de metano e de óxido nitroso em área de arroz irrigado influenciadas por sistemas de preparo do solo** 2014. 71f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Os sistemas de preparo do solo e manejo da cobertura vegetal em área de produção de arroz irrigado por alagamento apresentam peculiaridades e potenciais distintos de emissão de metano e óxido nitroso do solo. Considerando uma área de arroz irrigado, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência de sistemas de preparo do solo na emissão dos gases de efeito estufa metano e óxido nitroso, a fim de estabelecer sistemas com potenciais de mitigar a emissão desses gases. O experimento de campo foi realizado na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS. Foram avaliados três sistemas de preparo do solo: preparo convencional - ausência de manejo da palha e do solo no período de outono-inverno e preparo do solo na primavera, antes da semeadura do arroz; rolo-faca - manejo da palha com rolo-faca imediatamente após a colheita do arroz e semeadura direta na primavera; e preparo antecipado - preparo do solo no outono, dessecação e revolvimento do solo, por meio de gradagem superficial. As emissões de CH_4 e N_2O foram avaliadas nos períodos de entressafra e safra. As coletas dos gases de efeito estufa (GEE) foram realizadas, semanalmente, pelo método da câmara estática fechada. Com base nas emissões de CH_4 e de N_2O foi calculado o potencial de aquecimento global parcial ($\text{PAGp} = \text{CO}_2$ equivalente). O sistema de preparo convencional foi mais eficiente que os demais em mitigar as emissões de GEE ao longo do ano. O sistema de preparo antecipado apresentou as maiores emissões de CH_4 , as quais se concentraram na época de cultivo do arroz. O período de safra representou a maior parte do PAGp anual (safra+entressafra). Devido à alta emissão de CH_4 , o sistema de preparo antecipado foi responsável pelo maior PAGp , seguido do manejo com rolo-faca, em função da elevada emissão de N_2O e do sistema convencional, com menor PAGp anual. Os sistemas rolo-faca e convencional reduziram o PAGp em função das menores emissões de CH_4 ao longo do ano. Embora os sistemas de manejo de solo e da cobertura vegetal apresentem potenciais distintos de emissão, vários fatores associados ao ambiente e às práticas de manejo regulam a produção e emissão de CH_4 e N_2O , estes fatores devem ser considerados caso a caso, na estimativa do potencial emissor e mitigador desses gases de efeito estufa.

Palavras-chave: gases de efeito estufa, potencial de aquecimento global, operações de preparo do solo.

ABSTRACT

SILVA, Jaqueline Trombetta. **Methane and nitrous oxide emissions in irrigated rice area influenced by soil tillage systems**. 2014. 71f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

The different soil tillage systems and cover crop management in areas of flooded irrigated rice show distinct peculiarities and potential of soil methane and nitrous oxide emissions. Considering an area of irrigated rice, this work aimed to evaluate the influence of soil tillage systems in the emission of greenhouse gases such as methane and nitrous oxide in order to establish systems with potential to mitigate these gases emissions. The field experiment was performed in the Lowlands Experimental Station at Embrapa Temperate Climate, Capão do Leão, RS. Three management systems were evaluated: conventional tillage - no straw management and soil tillage during autumn-winter and soil tillage in the spring, before rice sowing; knife roller - straw management with knife roller immediately after rice harvesting and no-till in the spring; and advance preparation – soil tillage in autumn, desiccation and soil disturbance by shallow disking. Emissions of CH₄ and N₂O were evaluated in the pre-harvest and harvest periods. The sampling of greenhouse gases (GG) was conducted weekly through the closed static chamber method. The partial global warming potential (PGWp = CO₂ equivalent) was calculated based on CH₄ and N₂O emissions. Conventional tillage was more effective than the other systems to mitigate GG over the year. The advance preparation system showed the highest CH₄ emissions, which were concentrated in the period of rice cultivation. The harvest period accounted for the largest portion of the annual PGWp (harvest+pre-harvest). Due to the high emission of CH₄, the advance preparation system was responsible for the largest PGWp, followed by knife roller management, because of the high emission of N₂O and by the conventional system, with lower annual PGWp. The knife roller and conventional systems reduced the PGWp due to lower CH₄ emission throughout the year. Although soil and cover crop management systems show distinct emission potentials, several factors associated with the environment and management practices regulate the production and emission of CH₄ and N₂O. These factors must be considered case by case to estimate the transmitter and mitigation potential of these greenhouse gases.

Keywords: greenhouse gases, global warming potential, soil tillage operations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxos de CH_4 em área de cultivo de arroz irrigado, no período de entressafra, sob diferentes sistemas de preparo do solo.	40
Figura 2. Precipitação pluviométrica e temperatura média do ar, registradas durante o período de entressafra (abril a novembro de 2012) da cultura do arroz irrigado....	42
Figura 3. Fluxos de N_2O em área de cultivo de arroz irrigado, no período de entressafra, sob diferentes sistemas de preparo do solo.	43
Figura 4. Fluxos de CH_4 durante o cultivo do arroz irrigado por alagamento, no período de safra, sob diferentes sistemas de preparo do solo. E = emergência do arroz; I + N_1 = início da irrigação e 1ª adubação nitrogenada em cobertura; N_2 = segunda adubação nitrogenada em cobertura.	46
Figura 5. Valores de Eh (a) e pH (b) e teores de Fe^{2+} (c) e de Mn^{2+} (d) da solução do solo em Planossolo cultivado com arroz sob irrigação e diferentes sistema de preparo do solo.	48
Figura 6. Precipitação pluviométrica e temperatura média do ar, registradas durante o período de safra (novembro a abril) da cultura do arroz irrigado.....	49
Figura 7. Fluxos de N_2O durante o cultivo do arroz irrigado por alagamento, no período de safra, sob diferentes sistemas de preparo do solo. E = emergência do arroz; I + N_1 = início da irrigação e 1ª adubação nitrogenada em cobertura; N_2 = segunda adubação nitrogenada em cobertura.	50
Figura 8. Emissão total de CH_4 em área de cultivo de arroz irrigado por alagamento, sob diferentes sistemas de preparo do solo, durante o período de entressafra e de safra.	53
Figura 9. Emissão total de N_2O em área de cultivo de arroz irrigado por alagamento, sob diferentes sistemas de preparo do solo, durante o período de entressafra e de safra.	55

Figura 10. Contribuição do gás N_2O e CH_4 para o potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp), em área de cultivo de arroz irrigado por alagamento, sob diferentes sistemas de preparo do solo, durante o período de entressafra (a) e de safra (b)...58

Figura 11. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) em área de cultivo de arroz irrigado por alagamento, sob diferentes sistemas de preparo do solo, durante o período de entressafra e de safra.59

Figura 12. Produtividade de grãos de arroz (a), irrigado por alagamento, e índice PAGp anual/PG (b), sob diferentes sistemas de preparo do solo. Médias seguidas de letras distintas sobre as barras diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cronograma de operações de campo realizadas para a condução do experimento.....	34
Tabela 2. Contribuição dos gases CH ₄ e N ₂ O para o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) nos períodos de entressafra, safra e anual, para os sistemas de preparo antecipado, rolo-faca e convencional.....	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 Emissão de gases de efeito estufa (CH ₄ e N ₂ O) e a contribuição da atividade agrícola para esse fenômeno.....	16
2.2 A lavoura arrozeira e os fluxos de CH ₄ e N ₂ O	17
2.3 Produção e emissão de CH ₄ e N ₂ O em lavouras de arroz.....	19
2.4 Variáveis que influenciam a emissão de CH ₄ e N ₂ O	22
2.2.1 Temperatura e potencial redox	22
2.2.2 Cultivares	23
2.2.3 Práticas agrícolas	24
2.2.3.1 Manejo da água	25
2.2.3.2 Manejo do solo.....	26
2.2.3.3 Manejo de fertilizantes	27
2.5 Principais sistemas de manejo de solo e da palha utilizados na cultura do arroz irrigado no RS	28
3 HIPÓTESES.....	31
4 OBJETIVOS	32
5 MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1 Caracterização da área experimental	32
5.2 Tratamentos e delineamento experimental	33
5.3 Condução do experimento	33
5.4 Coletas e análise dos gases	36
5.5. Coleta e análise da solução do solo.....	38
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40

6.1 Variação temporal dos fluxos de CH ₄ e N ₂ O nos períodos de entressafra e de safra da cultura de arroz irrigado	40
6.1.1 Período de entressafra do arroz (outono/inverno de 2012)	40
6.1.2. Período de cultivo do arroz (safra 2012/2013)	45
6.2 Emissão total de CH ₄ e N ₂ O nos períodos de entressafra de 2012 e de safra 2012/2013	52
6.3 Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp)	56
6.4 Produtividade de grãos de arroz e Índice PAGp anual/PG (Potencial de Aquecimento Global parcial anual (PAGp anual/Produtividade de grãos).	61
7 CONCLUSÕES	62
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO GERAL

Metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) são considerados, junto com dióxido de carbono (CO_2), como os principais gases promotores do efeito estufa natural. Nas últimas décadas a concentração desses gases na atmosfera tem aumentado consideravelmente, principalmente após a revolução industrial (IPCC, 2007).

Especula-se que o aumento da concentração atmosférica dos GEE, gera um efeito estufa antrópico, o qual tem provocado alterações na temperatura média global, de aproximadamente $0,74^\circ\text{C}$ (IPCC, 2007). Os possíveis efeitos prejudiciais de um aquecimento global têm gerado preocupação nas autoridades governamentais, uma vez que, a temperatura média da terra, que é essencial para a vida na superfície do planeta, é de aproximadamente 15°C . Essa temperatura é mantida nesse valor como consequência do fenômeno de efeito estufa natural (CARVALHO, 2010). Embora emitidos em menor quantidade do que o CO_2 , N_2O e CH_4 apresentam, respectivamente, um potencial de aquecimento global (PAG) de 298 e 25 vezes maior em relação ao CO_2 , para um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (IPCC, 2007). Estes gases apresentaram um incremento na taxa de emissão anual em torno de 0,22% para o N_2O e de 3% para o CH_4 .

O aumento da concentração de GEE tem sido atribuído a ações antrópicas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis. Porém, a atividade agropecuária, em conjunto com a mudança no uso da terra, representam uma boa parcela, 22%, 55% e 80% das emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O , respectivamente (IPCC, 2007). Já no Brasil cerca de 75% das emissões de CO_2 , 91% das emissões de CH_4 e 94% das emissões de N_2O , são provenientes da agropecuária e mudança de uso da terra (CERRI & CERRI, 2007). Pode-se perceber que na agropecuária, o gás metano e óxido nitroso são os principais. As emissões de N_2O são representadas pelas emissões diretas, aproximadamente 64%, principalmente via fertilizantes agrícolas. Já as emissões CH_4 , são atribuídas à pecuária (90% das emissões) seguida do cultivo de arroz irrigado por alagamento, que representa 3% das emissões (MCTI, 2013).

Nesse sentido, o RS é considerado um estado potencialmente emissor, pois representa significativa parte da produção nacional de grãos, aproximadamente 15,8%, ocupando a 3ª posição entre os estados brasileiros (IBGE, 2013), além de contribuir com 67% da produção de arroz do país (CONAB, 2013), que é realizado no sistema de solo alagado. Segundo EMBRAPA (2006a, b) o Rio Grande do Sul já é considerado o maior emissor do país de N_2O e o principal estado emissor de CH_4 , com base no cultivo de arroz irrigado, com uma emissão de aproximadamente 4,5 Tg CO_2 equivalente (67% da emissão nacional).

No RS e em todo o Brasil, esse problema ambiental, tem despertado interesse de instituições de pesquisa, as quais têm buscado mecanismos para mitigar as emissões de GEE pela agricultura. No cultivo do arroz irrigado, vários são os fatores que podem interferir na emissão de gases de efeito estufa, principalmente aqueles que afetam a atividade dos microrganismos responsáveis pela produção de GEE, como as práticas culturais, incluindo o uso de fertilizantes, manejo do solo e da irrigação.

No cultivo do arroz irrigado, alguns estudos vêm sendo desenvolvidos, mais precisamente sobre as emissões de N_2O e CH_4 . Com relação a práticas culturais, relacionadas ao manejo do solo e da palha, por exemplo, foi observado que a antecipação do preparo pode ser capaz de mitigar as emissões de CH_4 . Enquanto que as emissões de N_2O podem ser potencializadas, quando a palha é mantida sobre a superfície do solo, até um preparo anterior a semeadura ou não Zschornack (2011) e Souza (2013). Entretanto, há necessidade de intensificar os estudos, para elucidar os processos envolvidos, inclusive com avaliações que incluam, além do período de cultivo do arroz, também o período de entressafra, uma vez que são poucas as referências sobre o assunto.

A produção de arroz em áreas de várzea do RS é feita sobre irrigação contínua da lavoura e pode envolver uma série de sistemas de cultivo e práticas agrícolas, como adubação e manejo da água de irrigação, que podem influenciar de forma diferenciada as emissões de GEE. Em áreas de produção de arroz, o preparo do solo pode ser realizado em qualquer época do ano, durante o período de entressafra. Porém, o preparo antecipado do solo e consequente incorporação da palha são realizados normalmente no outono, logo após a colheita da safra anterior, visando garantir a semeadura dos cultivos na época adequada. Já o preparo convencional é feito antecedendo a semeadura, na primavera. Alternativamente, a

esses preparos têm surgido o preparo com rolo-faca, que seria mais bem caracterizado como um manejo da palha, que é realizado no outono, pós-colheita do arroz.

Nesse aspecto os sistemas de manejo de solo e da palha, que consideram maior ou menor revolvimento do solo, com ou sem incorporação da palha, épocas distintas de manejo, como pós-colheita (outono) e antecedendo a semeadura (primavera), podem ter efeitos diversos sobre a produção e consequente emissão de gases como o CH_4 e o N_2O , pois podem alterar os processos microbianos, modificar a dinâmica do carbono orgânico, principal fonte de energia para realização dos processos vitais dos microrganismos, e consequentemente todos os fatores que do mesmo derivam. Assim podendo ser importantes mecanismos para auxiliar na mitigação nas emissões dos gases do efeito estufa, aliado aos sistemas de manejo já preconizados pelos produtores e sem afetar a produtividade da cultura.

Nesse contexto, com o intuito de avaliar sistemas de produção no cultivo do arroz irrigado por alagamento, com potenciais de mitigar as emissões de gases de efeito estufa. O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência de sistemas de preparo do solo em área de produção de arroz irrigado na emissão de gases de efeito estufa metano e óxido nitroso, a fim de estabelecer sistemas com potencial de mitigar as emissões desses gases.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Emissão de gases de efeito estufa (CH₄ e N₂O) e a contribuição da atividade agrícola para esse fenômeno

Dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) são os três principais gases que causam o efeito estufa (GEE), segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007). O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre devido à concentração desses gases na atmosfera e que permitem a passagem da radiação solar até a superfície terrestre e posteriormente absorvem a energia que é refletida de volta para a atmosfera. Consequentemente ao absorver parte dessa energia/radiação na atmosfera provocam o aumento da temperatura média do ar, permitindo que a temperatura média da atmosfera terrestre seja de 15 °C, que é essencial para a vida no planeta (CARVALHO et al., 2010).

Nas últimas décadas ações antrópicas tem promovido um aumento considerável da concentração atmosférica de gases de efeito estufa (IPCC, 2007), o que se acredita refletir no aumento observado na temperatura média global. Além de aumentar consideravelmente as emissões, os GEE CH₄ e N₂O, tem um potencial de aquecimento global 25 e 298 vezes maior do que o CO₂, considerando um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (FORSTER et al., 2007).

Vários são os setores responsáveis pela emissão de GEE, destacando-se: o de energia, principalmente pela queima de combustíveis fósseis; o da mudança de uso da terra e florestas, desmatamento e reduções da quantidade de carbono; e o da agropecuária, devido à fermentação entérica do gado, manejo de dejetos animais, solos agrícolas, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas (IPCC, 2007).

Atualmente, em nível mundial estima-se que a agricultura seja responsável por boa parte das emissões totais de GEE. Desse total aproximadamente 80 % e 55 % é representado, respectivamente, pelas emissões de N₂O e CH₄ (IPCC, 2007). Já no Brasil, estima-se que o setor agropecuário foi, em 2010, responsável por

aproximadamente 35% das emissões totais (437,2 Tg de CO₂eq), representando um aumento de 15% em relação às emissões de 2005. Já com relação ao uso da terra e florestas, estima-se que reduziu de 57% para 22% (22,6 de CH₄ e N₂O e 256,6 Tg de CO₂eq de CO₂), citados no relatório sobre estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2013). Segundo Cerri & Cerri (2007) as emissões, principalmente de GEE oriundos da mudança de uso da terra e agricultura, representam em torno de 91 e 94 % do total de emissões de CH₄ e N₂O, respectivamente.

Em nível de regional, o Rio Grande do Sul é responsável em média por 50% (47,3 Tg CO₂ equivalente) da emissão regional de GEE, sendo que desses 36% referem-se à emissão de N₂O e 54% à emissão de CH₄ (EMBRAPA, 2006a, b).

Com relação às emissões de CH₄ na agricultura e em nível de Brasil, a atividade pecuária representa, a maior parte nas emissões totais, estimada em cerca de 96%, seguido do cultivo do arroz irrigado e da queima de resíduos agrícolas da cana-de-açúcar (MCTI, 2013). O Rio Grande do Sul representa 67% da emissão nacional de CH₄, com base no cultivo do arroz irrigado.

O N₂O é representado principalmente por suas emissões diretas, as quais representam 64% das emissões totais, sendo que 21% dessas vêm da aplicação de adubos, fertilizantes sintéticos, incorporação no solo dos resíduos agrícolas e das áreas de cultivo de solos orgânicos e o restante de 43% é representada por animais em pastagens (MCTI, 2013).

A prática intensiva da agricultura no Brasil e no estado do Rio Grande do Sul, cultivando milhões de hectares com grãos, faz destes potenciais emissores de GEE.

2.2 A lavoura arrozeira e os fluxos de CH₄ e N₂O

O arroz é o segundo cereal mais cultivado do mundo, ocupando uma área de aproximadamente 158 milhões de hectares. Possui elevado potencial de aumento de produção e responde pelo suprimento de 20% das calorias consumidas na alimentação humana no mundo, desempenhando papel estratégico na solução de questões de segurança alimentar (SOSBAI, 2012).

É uma planta anual da família das Poáceas, classificada no grupo de plantas C3 (EMBRAPA, 2010). É adaptado a ambiente aquático, o que ocorre devido à

presença de um tecido (aerênquima) no interior da planta, que permite a circulação de gases e, conseqüentemente, trocas gasosas entre a atmosfera e a rizosfera (YOSHIDA, 1981; EMBRAPA, 2010).

O Brasil é o 9º maior produtor mundial de arroz, com uma produção que varia entre 11 e 13 milhões de toneladas (SOSABAI, 2012;). No Sul do país, onde a maior parte é produzida, o arroz é um produto importante na economia. O RS destaca-se como o maior produtor de arroz nacional, respondendo por aproximadamente 67% da produção brasileira, com uma área superior a um milhão de hectares, seguido por SC que representa 8 a 9% da produção, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (2013).

No RS, o cultivo deste grão se dá tradicionalmente nos sistemas de várzeas caracterizando-se pelo cultivo irrigado por inundação contínua da lavoura (AZAMBUJA, et al., 2004; EMBRAPA, 2008). O alagamento do solo durante o manejo da irrigação torna o solo um ambiente anaeróbico, como consequência da diminuição do oxigênio livre e da baixa taxa de difusão do O_2 na água (LE MER & ROGER, 2001). Na decomposição anaeróbica de material orgânico em áreas de arroz alagado ocorre a produção de gás metano (CH_4) (IPCC, 2007).

Quanto ao N_2O , as formas minerais de nitrogênio no solo são fontes potenciais desse gás para a atmosfera (GOMES, 2006). Na cultura do arroz, o nitrogênio é um dos elementos que promove as maiores respostas em produtividade, portanto um dos principais para a cultura (SOSBAI, 2012), sendo normalmente aplicado em cobertura em duas ou até três aplicações (DUARTE, 2006).

Segundo (EMBRAPA, 2006a, b) o Rio Grande do Sul é o maior emissor do país de N_2O e o principal estado emissor de CH_4 . Segundo o MCTI (2013) o cultivo do arroz representou 3% do total das emissões de GEE no país.

Estima-se que as emissões de CH_4 advindas do cultivo do arroz no RS representem aproximadamente 18% do total de CH_4 emitido. Porém, em relação às emissões de N_2O , mais estudos ainda são necessários para estimar com maior precisão as emissões em função do cultivo do arroz (ZSCHORNACK, 2011).

Sendo a aplicação de fertilizantes sintéticos nitrogenados, juntamente com a incorporação dos resíduos de cultura em solos agrícolas, e as lavouras de arroz por si só, fontes potenciais nas emissões de N_2O e CH_4 , respectivamente (IPCC, 2007), tornam o país e o estado, contribuintes relevantes na emissão de GEE. Outro fator

importante a considerar (MA et al., 2009), é que a produção de arroz deverá aumentar ainda mais, tanto em área como em intensidade, isso para atender à crescente demanda global por alimentos, acarretando consequentemente num aumento potencial das emissões de CH₄ e N₂O.

Segundo Neue et al. (1997) mudanças na gestão da água, gestão dos nutrientes, práticas culturais, e seleção de cultivares são formas de aumentar a produção e produtividade de arroz, assim como ao mesmo tempo podem ser promissoras na redução da emissão de gases de efeito estufa.

2.3 Produção e emissão de CH₄ e N₂O em lavouras de arroz

Em solos naturalmente alagados ou em lavouras de arroz, após o alagamento, uma série de transformações físicas, químicas e biológicas levam esses ambientes a um novo estado de equilíbrio (SOUSA et al., 2008), sendo que logo após a supressão do O₂ o metabolismo anaeróbico predomina (SILVA et al., 2008), proliferando assim os microrganismos anaeróbios facultativos e obrigatórios (NEUE et al., 1997).

Segundo Sousa et al. (2008) os microrganismos anaeróbicos obtêm energia a partir da oxidação do C orgânico, usando compostos oxidados (respiração anaeróbia) como aceptores finais de elétrons em seu metabolismo. Assim, nitrato (NO₃⁻), manganês (Mn⁴⁺), Ferro (Fe³⁺), sulfato (SO₄²⁻) e CO₂ são reduzidos para N₂, Mn²⁺, Fe²⁺, S²⁻ e CH₄, respectivamente, em um processo denominado de “redução do solo”.

Já na ausência de compostos inorgânicos utilizados como aceptores de elétrons, predomina o metabolismo anaeróbico do tipo fermentativo que é realizado em especial por bactérias metanogênicas, utilizando compostos orgânicos como doadores e aceptores de elétrons no processo de oxirredução (SILVA et al., 2008), tendo como produtos resultantes deste processo são predominantemente etanol, acetato, H₂, N₂, CO₂ e CH₄ (MOSIER et al, 1998).

As duas vias principais de produção de CH₄ em solos alagados são a Redução de CO₂ com H₂ (derivado de um composto orgânico) (Reação 1) e a transmetilação do ácido acético (Reação 2) (EMBRAPA, 2008).





Segundo Le Mer & Roger (2001) e Silva et al., (2008) as transformações/decomposição que degradam moléculas complexas em compostos mais simples exigem etapas sucessivas de mais de uma população de microrganismos. As ações são separadas em hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese e serão descritas mais detalhadamente a seguir:

- O primeiro processo que ocorre é a hidrólise de polímeros biológicos em monômeros (carboidratos, lipídios e proteínas) em compostos de cadeia simples (açúcares, ácidos orgânicos de cadeia longa e aminoácidos) por uma micoflora que pode ser tanto de aeróbios, como de anaeróbios facultativos ou obrigatórios.

- Na sequência ocorre a acidogênese, que nada mais é do que a fermentação intracelular dos compostos de cadeia simples, através da microflora fermentativa facultativa ou estritamente anaeróbica, formando os ácidos, acético, propiônico e butírico.

- Os metabólitos anteriores, com mais de dois carbonos, sofrem um processo de acetogênese, para a produção de ácido acético, por um grupo de bactérias acetotróficas, a partir de microrganismos anaeróbios obrigatórios.

- Por fim, o último passo da fermentação metanogênica é a formação de CH_4 , ou seja, a metanogênese, a partir dos compostos simples gerados anteriormente, como o ácido acético, assim como de H_2 , CO_2 , metil aminas.

A metanogênese requer condições anaeróbias (o que ocorre em valores mais baixos de Eh, geralmente ao redor de -200 mV), sendo restrita a microrganismos anaeróbios obrigatórios (SILVA et al., 2008), que pertencem ao filo Euryarchaeota do domínio Archae, normalmente tratadas como Archae metanogênicas (GARCIA, 1990).

Os principais processos responsáveis pela produção e emissão de N_2O são a nitrificação e a desnitrificação, ambos influenciados por condições físicas (difusão de O_2 e temperatura do solo), químicas (concentração de amônio e nitrato e, disponibilidade de C facilmente metabolizável) e biológicas do solo (atividade microbiana) (COSTA et al., 2008a). Esses dois processos estão baseados na oxidação do NH_4^+ para NO_3^- por bactérias quimioautotróficas e redução do NO_3^- para N_2O e N_2 , por bactérias como as do gênero *Pseudomonas*, respectivamente (SMITH et al., 2003). Com a diminuição da concentração de O_2 , o NO_3^- é o primeiro

composto a ser reduzido no solo pelos microrganismos anaeróbios facultativos (CAMARGO et al., 1999). Nesse processo, praticamente todo o nitrato (NO_3^-) presente pode ser reduzido a N_2O e N_2 , sendo esses perdidos para a atmosfera por volatilização (SOUSA et al., 2008).

A liberação dos gases (CH_4 e N_2O) do solo para a atmosfera ocorre por ebulição, difusão molecular e transporte por meio da planta de arroz (AULAKH et al., 2001; REDDY & DELAUNE, 2008). O mecanismo de liberação dos gases de maior importância se dá através do aerênquima das plantas de arroz, no qual o CH_4 e o N_2O entram pelas raízes e são liberados na parte aérea (REDDY & DELAUNE, 2008).

O processo de ebulição ocorre quando existe um aumento da pressão, devido à contínua produção de gases no solo em conjunto com a deficiência de liberação de gás pela inundação do solo pela água. Os gases aprisionados são posteriormente libertados de forma irregular do solo sob a forma de bolhas (REDDY & DELAUNE, 2008). Alguns autores relatam que o processo de ebulição de CH_4 , predomina durante a fase inicial de crescimento das plantas e durante operações culturais (WASSMANN et al., 1996), causado pelo baixo estabelecimento de raízes no solo (SCHUTZ et al., 1989).

Outro processo de liberação de gases, menos comum, é via difusão molecular. Segundo Reddy & Delaune (2008) ao estudar as emissões de CH_4 , relatam que a baixa solubilidade do mesmo em água limita o transporte difusivo em solo alagado, e mais CH_4 é oxidado em dióxido de carbono.

A principal via de emissão de CH_4 e N_2O em lavouras de arroz é através da própria planta de arroz, pelos aerênquimas. Nouchi et al. (1990) ao estudar os mecanismo de transporte do metano da rizosfera para a atmosfera através de plantas de arroz estima que ocorra uma emissão, de metano, via planta superior a 80%, o que pode ocorrer para outros gases dissolvidos na água do solo, como o óxido nitroso.

Reddy & Delaune (2008) cita que é principalmente via aerênquimas de plantas, que ocorre o transporte de ar (oxigênio) para as raízes e de CH_4 e N_2O , a partir do solo, para a atmosfera. E que o fluxo de gases nos aerênquimas depende de gradientes de concentração e pressão total e estrutura interna.

2.4 Variáveis que influenciam a emissão de CH₄ e N₂O

Os solos têm papel fundamental nos ciclos de carbono e nitrogênio, constituindo uma importante reserva e fonte desses elementos (ESCOBAR, 2008). A agricultura, através do uso e o manejo do solo influencia o fluxo de GEE em agroecossistemas (LAL et al., 1995), devendo assim auxiliar também na mitigação dos mesmos, o que torna de extrema importância considerar os diversos fatores que apresentam influência sobre a produção e consequente emissão de CH₄ e N₂O.

Fatores como temperatura, potencial de oxirredução, cultivares, manejo de fertilizantes e do solo, estão relacionados à dinâmica do CH₄ e N₂O, e influenciam a produção e emissão desses GEE.

2.2.1 Temperatura e potencial redox

A dinâmica da emissão de CH₄ e N₂O em lavouras de arroz está intimamente relacionada com o potencial redox do solo (HOU et al., 2000, LE MER & ROGER, 2001) e da atividade microbiana (HOU et al., 2000; CONRAD, 1996; LE MER & ROGER, 2001). Nesse sentido, a temperatura pode ser um fator importante, sendo que os microrganismos, de uma maneira geral, têm seu processo de crescimento dependente de reações químicas, as quais são alteradas pela temperatura.

Segundo Conrad et al. (2002) os microrganismos metanogênicos, por serem dominadas por diferentes espécies, podem variar sua temperatura ótima entre 30°C e 40°C (CONRAD et al., 1989; LE MER & ROGER, 2001). Por outro lado, a ocorrência de baixas temperaturas no solo tende a reduzir a produção de CH₄ pela diminuição da atividade dos microrganismos metanogênicos e também das bactérias responsáveis pela fermentação (Le Me & Roger, 2001).

As emissões de CH₄ podem ser influenciadas pela temperatura do solo e da água (COSTA et al., 2008b). Em estudo realizado no RS em experimento com arroz foi verificado que a emissão de CH₄ foi positivamente relacionada com a temperatura do solo e da água. Para cada grau de aumento da temperatura do solo, em sistema de plantio direto, como por exemplo, de 21°C para 22°C, ocorreu um incremento nas emissões de CH₄ de 1,2 mg m⁻² h⁻¹ CH₄, e também positivamente relacionada com a

temperatura da água, em sistema de preparo convencional do solo, quando observou que para cada grau de aumento da temperatura, por exemplo de 24°C para 25°C, de 25°C para 26°C, as emissões de CH₄ tiveram um incremento de 5,7 mg m⁻² h⁻¹. Esse mesmo autor, ao avaliar as emissões durante o período de 24 horas, verificou que as taxas de emissão de CH₄ normalmente aumentam após o amanhecer, atingindo o pico máximo de emissão no início da tarde, entre 12 e 15 h, e entram em declínio durante a noite, quando as temperaturas diminuem (COSTA et al., 2008b).

O potencial de oxirredução do solo é fator considerável na produção de CH₄, pois a metanogênese requer anaerobiose estrita, iniciando a um potencial redox (Eh) menor que -150mV (WANG et al.,1993); LE MER & ROGER, 2001).

Quanto à influência da temperatura sobre as emissões de N₂O são poucos os trabalhos que relatam sobre o assunto e as informações são contrastantes. Hou (2000) ao avaliar o processo de emissão de metano e óxido nitroso, em um campo de arroz na China, em relação ao potencial redox do solo e processos microbiológicos percebeu que as emissões de óxido nitroso, sem irrigação, ocorreram principalmente quando a temperatura do solo foi relativamente mais baixa. Já segundo Souza (2013), em estudo feito em lavouras de arroz no RS, as temperaturas médias mais elevadas do solo (em torno de 15°C e 17°C) no período de entressafra, possivelmente favoreceram a atividade microbiana e a decomposição dos restos culturais do arroz nesse estudo, produzindo maior quantidade de N₂O, quando comparada com trabalhos semelhantes aos de Hou (2000), citado anteriormente. Iida et al. (2007) também verificou aumentou as emissões de N₂O com o aumento da temperatura do solo e sugere influência da temperatura (verificada em torno de 24 e 26°C) sobre as atividades de desnitrificação das bactérias.

2.2.2 Cultivares

As plantas de arroz fornecem carbono ao solo por meio de exsudatos de raiz, raízes em decomposição e reciclagem de material vegetal e agem como canais para trocas de gás para a atmosfera (LIMA et al., 2013), podendo influenciar a produção e liberação de GEE.

O arroz possui mais de 80000 variedades, distribuídas em mais de 110 países, sendo a maioria da espécie *Oryza sativa* (YOSHIDA, 1981). Nesse sentido, a busca por variedades capazes de mitigar as emissões de GEE, em função da influência de suas características varietais ou agronômicas, sendo pelo transporte ou pela produção de substratos favoráveis a produção de CH₄, tem sido foco de estudo.

Com relação às emissões de N₂O, não existem estudos comparando as emissões entre diferentes cultivares. Já quanto ao CH₄ alguns autores têm estudado o comportamento de cultivares, e observam que diferenças varietais atuam de forma diferente sobre o potencial de emissão de CH₄, ou seja, o transporte de gases (AULAKH et al., 2001).

Aulakh et al. (2000) verificaram que plantas com menos biomassa e menores perfilhos podem minimizar a emissão de CH₄, pois esses fatores da planta interferem no transporte desse gás. Estes autores também observaram que a maior taxa de emissão está relacionada ao período reprodutivo, pois é a época em que ocorre o completo desenvolvimento dos aerênquimas, principal via de transporte de CH₄, e ocorre o aumento de exudatos da raiz que servem de substrato para as bactérias metanogênicas (RUSCHEL, 1992)

Porém, Moterle (2011), ao estudar os fluxos de CH₄ em diferentes cultivares de arroz, concluiu que as características morfofisiológicas não explicam completamente as diferenças de fluxos de CH₄ entre as cultivares, ou seja, as diferenças no fluxo de CH₄ ocorrem em função de uma associação de fatores, incluindo os fisiológicos, ambientais e genéticos, não demonstrados em sua morfologia. Conclusão semelhante à chegada por Wassmann et al., (2002) ao avaliar padrões de emissões de CH₄ em lavouras de arroz, onde verificou que as diferenças específicas de cada cultivar influenciam pouco na emissão de CH₄, em comparação com a gestão de outros efeitos e fatores de solo e clima; que as emissões podem variar de época para época e pode ser muito evasivo para uma classificação sólida em termos de emissões potenciais desse gás.

2.2.3 Práticas agrícolas

As práticas de manejo são, possivelmente, os principais fatores que afetam as emissões de GEE (GOMES, 2006), pois as práticas agrícolas realizadas antes e durante o cultivo do arroz, associadas às condições meteorológicas, determinam a

produção e a emissão de gases (ZSCHORNACK, 2011). O Manejo da água, pela irrigação da lavoura, a fertilização e os sistemas de manejo de solo, como o plantio direto, convencional e cultivo mínimo, são os principais fatores associados a produção de GEE.

2.2.3.1 Manejo da água

O manejo da água em arroz irrigado por alagamento é fundamental para o desenvolvimento da cultura, podendo afetar o potencial produtivo da cultura, por interferir na disponibilidade de nutrientes e de substâncias tóxicas e diminuir o estresse em decorrência das altas temperaturas (SOSBAI, 2012), sendo que a irrigação da lavoura no estado do RS caracteriza-se pela inundação contínua da lavoura (AZAMBUJA, et al., 2004; EMBRAPA, 2010).

Com o alagamento do solo o metabolismo microbiano é alterado, a população microbiana é alterada e os produtos da decomposição afetam os estoques de carbono no solo, a qualidade da matéria orgânica do solo, a liberação de ácidos orgânicos e a emissão de gases (SILVA et al., 2008), como o CH_4 e N_2O .

Quanto à emissão de CH_4 o regime de água no solo, pode ser um importante fator no controle da emissão, sobretudo quando a drenagem é utilizada ao longo da estação de crescimento (WASSMANN et al., 2000a). Porém a drenagem do solo durante o cultivo do arroz é uma prática de manejo que estimula os processos de nitrificação e desnitrificação, promovendo também a produção de N_2O do solo (Yu & Patrick, 2004).

No RS, em cultivo de arroz irrigado, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidas com o intuito de avaliar a influência do manejo da irrigação nas emissões de GEE, como o CH_4 e N_2O Zschornack (2011) e Buss (2012).

Zschornack (2011) e Buss (2012) verificaram que a irrigação intermitente, quando da drenagem, promove redução nas emissões de CH_4 do solo em cultivo de arroz, porém potencializa as emissões de N_2O , mas mesmo assim é mais eficiente, constituindo-se numa estratégia eficiente para redução do potencial de aquecimento global. Buss (2012) também comparou as emissões do sistema de irrigação contínua com o sistema de irrigação por aspersão, e verificou que o sistema de irrigação do arroz por reduz as emissões de CH_4 do solo, porém aumenta as emissões de N_2O .

2.2.3.2 Manejo do solo

Os diferentes manejos do solo influenciam as características químicas, físicas e biológicas, podendo acarretar em diferentes emissões de GEE. O revolvimento do solo, a adição/incorporação de resíduos vegetais, que consequentemente resultam em efeitos sobre disponibilidade de C e N, estruturação do solo e na atividade dos microrganismos, aliada aos efeitos ocasionados pela umidade do solo, deve receber maior atenção.

As práticas de manejo influenciam fatores controladores da dinâmica do C em solos agrícolas e, portanto, seus estoques de C orgânico e os fluxos de C no sistema solo-atmosfera na forma de dióxido de carbono (CO_2) em solo em condições aeróbias e metano (CH_4) em solo inundado (COSTA, 2005). Em lavouras de arroz, a metanogênese é influenciada por fontes de C disponíveis nos sistemas de produção (LIMA et al., 2013), além de outros fatores.

Nesse sentido, a qualidade do material orgânico aportado está intimamente associada com a produção e a emissão de CH_4 no solo (YAO et al., 2010), assim como a quantidade e o C orgânico total estão positivamente relacionadas com a produção de CH_4 (WANG et al., 1993, 1992). Os mesmos autores observaram que quanto maiores foram às quantidades de palha de arroz adicionado ao solo, maiores foram às produções de CH_4 , associando ao fato de que a aplicação de carbono extra ao solo foi necessária para a indução da metanogênese e consequentemente maior produção de metano. Segundo Bayer et al., (2012) a indução da metanogênese é causada pela estimulação da biomassa microbiana, resultante das entradas de C e N pela adição e incorporação de palha.

Segundo Souza (2013) para reduzir as emissões anuais de CH_4 é importante selecionar sistemas de manejo que incorporem ou eliminem a palha de arroz durante a entressafra, para que no momento do alagamento não haja presença de resíduos que sirvam como substrato para a metanogênese.

Quando a influência de sistemas de manejo de solo nas emissões de N_2O , alguns autores reportam que ocorre ao contrário do que é observado para o CH_4 , ou seja, a aplicação de resíduos orgânicos ao solo inibe as emissões de N_2O durante o alagamento em solos cultivados com arroz (MA et al., 2009).

Zou et al. (2005) verificou que a incorporação de palha de trigo aumentou as emissões CH_4 , mas diminuiu ligeiramente as emissões de N_2O . Segundo Ma et al. (2009) a aplicação e incorporação de resíduos, com alta relação C/N, como a palha de arroz, poderia estimular a imobilização microbiana do N, e consequentemente reduzir a disponibilidade de N para os processos envolvidos na produção de N_2O no solo.

Souza (2013) verificou os maiores picos de emissão de N_2O na safra em tratamentos em que a palha foi mantida sobre a superfície do solo. Com relação a sistemas que mantêm a palha em superfície do solo, como ocorre nos sistemas em cultivo mínimo e em plantio direto, a presença do oxigênio nessa camada estimula o processo de nitrificação, e pode repercutir no aumento das emissões de N_2O do solo, pelo maior teor de nitrato (MA et al., 2009). Segundo Zanatta (2009) a palha em superfície, além de manter a umidade do solo, também fornece C e N lábeis em maior quantidade que em sistemas com revolvimento de solo, como o preparo convencional, aumentando e a desnitrificação e as emissões de N_2O .

2.2.3.3 Manejo de fertilizantes

A utilização de fertilizantes é prática convencional na agricultura. Segundo a Sosbai (2010) a grande maioria dos fertilizantes utilizados na lavoura arrozeira são os minerais, prontamente solúveis, sendo que o nitrogênio é o principal fertilizante utilizado, representando o nutriente que a cultura mais responde em produtividade.

Emissões de N_2O pelo uso da adubação nitrogenada têm sido bastante estudadas. Alguns estudos têm mostrado que o aumento da dose aplicada de fertilizantes nitrogenados reflete em maiores emissões (CAI et al., 1997). Ahmad et al., (2009) ao avaliar diferentes sistemas de cultivo de arroz na Índia, sob plantio direto e preparo convencional, com e sem fertilização, verificou que emissões significativamente maiores ocorreram nos tratamentos com adubação, quando comparado a tratamentos sem adubação.

Segundo Cai et al. (1997) o tipo de fertilizante nitrogenado também pode influenciar a emissão de N_2O . Eles observaram emissões de N_2O visivelmente maiores em tratamento com sulfato de amônio, quando comparado a tratamentos com ureia, porém segundo eles, sem explicações satisfatórias.

Segundo Souza (2013) as maiores emissões ocorrem no período de entressafra, quando os solos de várzeas intercalam ciclos de umedecimento e secagem, onde os microrganismos atuam realizando os processos sequenciais de mineralização nitrificação-desnitrificação, tornando assim, importante a quantificação das emissões desse gás durante todo o ano.

A adubação também pode afetar a emissão de CH_4 . As emissões de CH_4 parecem ser influenciadas pelo tipo e pela dose de aplicação, porém os efeitos do uso de fertilizantes nitrogenados são muitas vezes contraditórios (LIMA et al., 2013).

Cai et al. (1997) ao avaliar a utilização fertilizantes os efeitos da fertilização nitrogenada sobre a emissão de CH_4 observaram diferenças nos fluxos médios de CH_4 , os quais diminuem com o aumento da dose aplicada, assim como observou que o tipo de fertilizante reflete sobre o fluxo médio de CH_4 . Ao comparar o uso de sulfato de amônia, nas doses aplicadas de 100 e 300 kg ha⁻¹ de N, verificaram uma diminuição de 42 e 60%, ao passo que a aplicação de ureia reduziu a emissão em apenas 7 e 14%, respectivamente.

Já Minami (1995) verificou que a adição de sulfato de amônio em solos inundados estimulam as emissões de CH_4 , quando comparado aos solos sem fertilização, devido ao aumento do potencial redox e efeito tóxico dos produtos de reação do sulfato, além de aumentar a atividade de bactérias redutoras de sulfato, as quais competem com as metanogênicas por substrato.

Porém, é importante avaliar a combinação dos fatores devendo-se atentar para a possibilidade de um efeito estimulante sobre a emissão de N_2O quando da redução da emissão de CH_4 , ou vice-versa.

2.5 Principais sistemas de manejo de solo e da palha utilizados na cultura do arroz irrigado no RS

Com o intuito de garantir a produtividade é extremamente importante avaliar os sistemas preconizados pelos agricultores, para assim dentro destes, avaliar suas potencialidades em mitigar as emissões de GEE. De acordo com a Sosbai (2012), no âmbito da lavoura de arroz do sul do Brasil, os principais sistemas de cultivo utilizados são o convencional, o cultivo mínimo, sistema plantio direto e pré-germinado.

No estado do RS, em regiões de várzea, onde existe predomínio da monocultura do arroz, verifica-se que o manejo do solo e dos resíduos culturais pode ser feitos em duas épocas: após a colheita ou antecedendo a semeadura da cultura. Essas formas de manejo dos resíduos culturais têm implicações diferentes sobre as emissões de GEE (SOUZA, 2013).

O sistema convencional compreende o preparo do solo por meio de aração e gradagem, visando à destruição de camadas compactadas, à eliminação de plantas daninhas, e à incorporação de calcário, fertilizantes, agroquímicos, além de fragmentar e incorporar também a palha. O sistema de plantio direto, considerado um sistema conservacionista, adotado inicialmente com o objetivo de controle do arroz vermelho, consiste na semeadura da cultura diretamente sob uma cobertura vegetal dessecada quimicamente, ou sob resíduos da cultura anterior, sem preparo mecânico do solo (GOMES et al., 2004).

O cultivo mínimo caracteriza-se pelo preparo antecipado do solo, realizado normalmente no outono ou início da primavera, e semeadura direta na época recomendada, de forma a haver tempo suficiente para a formação de cobertura vegetal, ao estimular a emergência de plantas daninhas e outras plantas, como o azevém, que normalmente é controlado pelo uso de herbicidas. Esse sistema caracteriza-se pelo menor revolvimento do solo, quando comparado ao convencional, em decorrência da operação de semeadura, a qual é realizada de forma direta (SOSBAI, 2010).

No preparo antecipado, o uso do rolo-faca tem se tornado uma ferramenta na otimização do preparo. Essa operação de preparo é realizada logo após a colheita, com presença de lâmina de água no solo. O equipamento do tipo rolo-faca permite o manejo do solo quando o emprego de outros equipamentos não é viável, pois para utilização do mesmo, é necessário que o solo tenha uma lâmina mínima de água, decorrente da colheita com água ou do preparo após período chuvoso, comum no inverno (EMBRAPA, 2010).

3 HIPÓTESES

As emissões de CH_4 e N_2O são menores durante o cultivo do arroz, quando o preparo do solo, que promove o revolvimento do solo e a incorporação da palha, é realizado no outono/inverno (entressafra), como ocorre no sistema de preparo com rolo-faca e antecipado.

O período de cultivo (safra) emite mais metano do que o período de entressafra. A realização de operações de preparo, antecedendo a semeadura (na primavera), como ocorre no sistema de preparo convencional, favorecem as emissões de CH_4 , assim como sistemas de preparo do solo, que propiciam maior aporte de material vegetal.

A contribuição do CH_4 para o Potencial de Aquecimento global parcial (PAGp), em áreas cultivadas com arroz irrigado, é superior à do N_2O , durante o período de cultivo. Já, durante o período de entressafra a contribuição do N_2O é superior.

O PAGp anual (safra + entressafra) é menor em sistemas de preparo do solo, nos quais as operações de preparo são feitas no outono/inverno (entressafra).

4 OBJETIVOS

Avaliar o efeito de sistemas de preparo do solo sobre as emissões de metano e óxido nitroso no período de entressafra e de cultivo do arroz irrigado (safra)

Avaliar o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp), a partir das emissões de metano e óxido nitroso observadas, em três sistemas de preparo do solo, na cultura do arroz irrigado;

Avaliar as condições de oxirredução do solo durante o período de alagamento na cultura do arroz, nas áreas sobre diferentes sistemas de preparo do solo e relacioná-las com as emissões de metano e de óxido nitroso.

5 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo compreendeu um experimento de campo para avaliação do efeito da época e das operações de preparo do solo sobre as emissões de metano e de óxido nitroso do solo, nos períodos de entressafra e de cultivo de arroz irrigado.

5.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado de abril de 2012 a maio de 2013, compreendendo os períodos da entressafra de 2012 e da safra agrícola 2012/2013. A área experimental localiza-se na Estação Experimental Terras Baixas (ETB), da Embrapa Clima Temperado, município de Capão do Leão, RS, com coordenadas geográficas 31°52'00" de latitude Sul e 52°21'24" de longitude Oeste.

O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háplico (STRECK et al., 2008) e o clima, como subtropical úmido ou temperado (Cfa), conforme classificação de Köppen, com temperatura média anual de 17,8°C e precipitação média anual de 1366,9 mm (normais climatológicas relativas ao período de 1971 a 2000).

Anteriormente à instalação do experimento, na safra agrícola 2011/2012, a área experimental foi cultivada com arroz irrigado por alagamento do solo, procedendo-se à colheita em 02/04/2012. Esta operação foi realizada em solo mantido com lâmina de água, utilizando-se colheitadeira combinada, modelo 4LZ-160B.

Após a secagem do solo, este foi amostrado (amostra composta), na camada de 0-20 cm de profundidade, para caracterização química e física, obtendo-se os seguintes resultados: carbono orgânico 1,13 g kg⁻¹; pH – 5,5; 39 mg kg⁻¹ de P e 34 mg kg⁻¹ de K extraído por Mehlich⁻¹.

Para quantificação da matéria seca e caracterização da composição química da mesma, foram realizadas duas amostragens de material vegetal durante o estudo, em triplicata. A primeira foi realizada após a colheita do arroz, no outono e a segunda foi realizada antecedendo as operações de preparo do solo previstas para a primavera e o início da safra 12/2013. A quantidade de matéria seca observada na

primeira amostragem foi de 7750 kg ha⁻¹, referente à biomassa oriunda da cultura do arroz, sendo uniforme nos três tratamentos observados. Na segunda coleta, foi amostrado material vegetal oriundo da vegetação espontânea (plantas daninhas, azevém, etc.) e as quantidades de matéria seca observadas foram: 2931, 3219 e 5848 kg ha⁻¹, no sistema de preparo convencional, rolo-faca e antecipado, respectivamente.

5.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos compreenderam variações na época e nas operações de preparo do solo/manejo da cobertura vegetal pós-colheita do arroz, sendo: preparo convencional (PC) - colheita do arroz, mantendo-se a palha em superfície no período de outono-inverno e procedendo-se o preparo do solo na primavera, imediatamente antes da semeadura do arroz; rolo-faca (RF) - colheita do arroz, seguida de imediato manejo da palha com rolo-faca e dessecação da vegetação espontânea na primavera, antecedendo a semeadura do arroz em sistema plantio direto; e preparo antecipado (PA) - colheita do arroz seguida de preparo do solo no outono, dessecação da cobertura vegetal na primavera e incorporação superficial da cobertura vegetal, imediatamente antes da semeadura do arroz.

A disposição dos tratamentos segue delineamento experimental em faixas, com dimensões de 20 m x 100 m. Em cada faixa, foram distribuídos aleatoriamente três sistemas coletores de gases de efeito estufa, do tipo estático fechado, constituindo as repetições dos tratamentos.

5.3 Condução do experimento

Na tabela 1 são apresentadas por período e em ordem cronológica as principais operações realizadas durante o estudo.

Tabela 1. Cronograma de operações de campo realizadas para a condução do experimento.

Operações de campo	Período
	Entressafra 2012
Colheita	02 de abril de 2012
Preparo do solo com rolo-faca	02 de abril de 2012
Preparo antecipado do solo	19 de abril de 2012
Instalação dos coletores	27 de abril de 2012
Início da coleta de gases	27 de abril de 2012
Última coleta de gases	19 de novembro de 2012
Operações de campo	Safra 12/2013
Preparo do solo convencional	24 de novembro de 2012
Preparo do solo superficial	24 de novembro de 2012
Semeadura do arroz	28 de novembro de 2012
Início das coletas	29 de novembro de 2012
1ª aplicação nitrogenada	10 de janeiro de 2013
Entrada da água	10 de janeiro de 2013
2ª adubação nitrogenada	05 de fevereiro de 2013
Colheita	30 de abril de 2013
Última coleta de gases	30 de abril de 2013

O experimento teve início no mês de abril de 2012, após a colheita do arroz na safra 2011/2012. No tratamento com preparo convencional, não se procedeu qualquer preparo do solo ou manejo da cobertura vegetal no período de outono/inverno (entressafra de 2012). O manejo do solo e da cobertura vegetal ocorreu na primavera, no mês de novembro, imediatamente antes da semeadura da safra subsequente de arroz (2012/2013). As operações de preparo compreenderam aração, com grade aradora, e duas gradagens, com grade niveladora, promovendo a incorporação da palha remanescente do cultivo de arroz e da vegetação espontânea.

No tratamento rolo-faca, o manejo do solo com esse equipamento foi realizado imediatamente após a colheita do arroz, na presença de lâmina de água. Na primavera, procedeu-se a dessecação da vegetação espontânea e a semeadura do arroz em sistema plantio direto.

Por sua vez, no tratamento com preparo antecipado, o manejo do solo, compreendendo uma aração e duas gradagens, foi realizado no outono, em solo seco, 17 dias após a colheita do arroz. Na primavera, procedeu-se o nivelamento da superfície do terreno, por meio de gradagem superficial, para viabilizar a semeadura e emergência do arroz subsequente, que foi semeado em plantio direto sobre resteva dessecada.

Os sistemas coletores de gases foram instaladas logo após a implementação dos manejos definidos para o período da entressafra, que permaneceram nos mesmos locais até o momento dos manejos definidos para a safra, quando foram retiradas e, posteriormente, realocadas nos mesmos locais.

Na primavera, antecedendo o manejo do solo e da cobertura vegetal previstos pelos tratamentos, realizou-se a amostragem do material vegetal presente nas parcelas experimentais, em triplicata, para avaliação da produção de biomassa vegetal e caracterização química.

A semeadura do arroz foi realizada na última semana de novembro de 2012, utilizando a cultivar BRS Sinuelo CL, com uma densidade de 110 kg ha^{-1} de sementes viáveis. Simultaneamente, foi realizada a adubação de base (300 kg ha^{-1} da formulação 5-20-20), definida de acordo com as recomendações para a cultura (SOSBAI, 2012).

A adubação de cobertura foi parcelada em duas aplicações iguais de 55 kg ha^{-1} de N, como ureia, nos estádios de quatro folhas (V4) e de iniciação da panícula (R0). A primeira cobertura com nitrogênio foi realizada em solo seco, antecedendo o início da irrigação definitiva, e a segunda, sobre uma lâmina de água não circulante. Os demais tratos culturais seguiram as recomendações técnicas para a cultura de arroz irrigado (SOSBAI, 2012).

Para o acompanhamento dos estádios de desenvolvimento da cultura, utilizou-se, como referência, a escala de Counce et al. (2000). Já o estágio de iniciação da panícula foi estabelecido considerando-se sua ocorrência com quatro dias de antecedência da diferenciação da panícula (estádio R1) (STANSEL, 1975), que foi estimada pelo método de graus-dia (STEINMETZ et al., 2010).

A entrada da água ocorreu no estágio de cinco folhas (V5). Após o estabelecimento da lâmina de irrigação, procurou-se mantê-la com aproximadamente 7,5 cm de altura até o estágio de maturação (R9). A colheita da Safra 2012/2013 ocorreu no final do mês de abril de 2013.

5.4 Coletas e análise dos gases

As avaliações de emissão de gases de efeito estufa, CH₄ e N₂O foram realizadas em área cultivada com arroz irrigado por alagamento, no período de Entressafra 2011/2012 e Safra 2012/2013. No período de entressafra do arroz, as coletas de ar iniciaram-se em abril de 2012 e estenderam-se até o mês de novembro do mesmo ano. No período da safra de primavera/verão, iniciando ainda no mês de novembro de 2012 e sendo concluídas em abril de 2013, totalizando um ano de avaliações. As amostragens foram realizadas semanalmente, sendo intensificadas, porém, nas épocas das adubações nitrogenadas em cobertura para o arroz, quando foram realizadas, em média, a cada dois dias.

As amostragens do ar foram realizadas utilizando-se o método da câmara estática fechada, descrito por Mosier (1989). A câmara estática consiste de uma base de alumínio, de 63 cm x 63 cm e 30 cm de altura, fixada ao solo à aproximadamente 5 cm de profundidade e ali permanecendo durante todo o período de coleta. A base possui uma canaleta e dois orifícios em lados opostos, que permitem a circulação de ar e de água entre os sistemas coletores e o restante das parcelas experimentais. Essas bases servem de suporte para a câmara (topo) no momento das coletas.

A câmara (topo) é composta por um tampo de alumínio contendo dois ventiladores, os quais são conectados a uma bateria, que é ligada por 30 segundos, anteriormente aos tempos de coleta, para acioná-los com a finalidade de homogeneizar o ar no interior da câmara. Na parte superior do topo é instalado, ainda, um termômetro digital de haste, que registra a temperatura do ar no interior da câmara, e uma válvula de três vias, acoplada a um tubo plástico, que é ligado ao interior da câmara. Essa válvula, no momento da coleta, é acoplada a válvula da seringa, e permite a retirada das amostras de ar do interior da câmara durante as coletas.

Por ocasião das coletas, as câmaras/topos foram acoplados às bases e os conjuntos topos/bases foram vedados hermeticamente com a colocação de água na canaletas das bases. Da mesma forma, os orifícios das bases são vedados com rolhas.

As amostragens de ar foram realizadas sempre durante o período da manhã, no intervalo entre 9 e 12 horas (COSTA et al., 2008b), e em tempos pré-determinados (0, 5, 10 e 20 minutos) após o fechamento da câmara estática.

À medida que as plantas de arroz cresciam, passou-se a utilizar um ou dois extensores de alumínio, de mesma dimensão das bases, inseridos entre essas e os topos das câmaras.

As coletas de ar foram feitas com seringas de polipropileno de 20 mL, acopladas na parte superior da câmara (topo). Em cada seringa foi adaptada uma válvula de três vias, a qual era fechada imediatamente após a coleta, sendo as seringas acondicionadas em caixas de isopor resfriadas, com gelo gel e, posteriormente, transferidas para frascos com vácuo e bem vedados, os quais em seguida foram transportados até os locais de análise. As análises foram feitas no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental, do Departamento de Solos, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

As concentrações de CH₄ e de N₂O foram determinadas através de cromatografia gasosa, em cromatógrafo Shimadzu 2014 (modelo “Greenhouse”). O equipamento possui três colunas empacotadas. O N₂O é quantificado via detector de captura de elétrons (ECD) a 325°C, e o CH₄ quantificado no detector de ionização de chama (FID) a 250°C. Os fluxos de CH₄ e N₂O foram calculados utilizando-se a equação 3:

$$f = (\Delta Q / \Delta t) \cdot (PV / RT) \cdot (M / A) \quad (\text{Equação 3})$$

onde: f é o fluxo de N₂O ou CH₄ (μg de N₂O ou CH₄ $\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$); Q é a quantidade do gás ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) na câmara no momento da coleta; P é a pressão atmosférica (atm) no interior da câmara - assumida como 1 atm; V é o volume da câmara (L); R é a constante dos gases ideais (0,08205 atm. L $\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$); T é a temperatura dentro da câmara no momento da coleta (K); M é a massa molar do gás ($\mu\text{g mol}^{-1}$) e A é a área da base da câmara (m^2). A taxa de variação do gás no interior da câmara foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo. A partir dos valores de fluxo calculados foram estimadas as emissões diárias. A emissão total do período avaliado foi calculada pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de N₂O e de CH₄ do solo (GOMES et al., 2009).

O potencial de aquecimento global parcial (PAGp) foi calculado com base no potencial de aquecimento global (PAG) de cada gás, ao converter as emissões acumuladas de CH₄ e de N₂O para CO₂ equivalente (kg CO₂ equiv. ha⁻¹). O CH₄ apresenta PAG de 25 vezes e o N₂O de 298, em relação ao dióxido de carbono – CO₂, considerando-se um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (FORSTER et al., 2007).

Para a interpretação dos resultados, os dados das emissões totais de CH₄ e N₂O, assim como PAGp, foram subdivididos nos dois períodos estudados, entressafra e safra, realizando-se, ainda, a totalização anual.

Para análise dos dados utilizou-se estatística descritiva.

5.5. Coleta e análise da solução do solo

Durante o período de irrigação do arroz por inundação, simultaneamente às coletas de amostras de ar, realizaram-se coletas semanais de solução do solo das parcelas experimentais. A primeira coleta foi realizada aproximadamente sete dias após a estabilização da lâmina de água.

Os coletores de solução foram instalados anteriormente a entrada de água nas parcelas, perfazendo três repetições por tratamento. As amostragens foram feitas com base no método desenvolvido por Sousa et al. (2002), adaptado para experimentos de campo.

O coletor utilizado foi feito com um tubo de polietileno vedado em uma das extremidade, perfurado e enrolado com tela de nylon ao longo de toda a porção perfurada e amarrando com linha de nylon. Isso evitou que partículas de solo mais finas fossem succionadas juntamente com a solução do solo. O tubo é enrolado sobre si, na forma de uma espiral. Esse espiral foi posicionado a 10 cm de profundidade para extração da solução do solo, a qual é realizada por sucção, por meio de uma seringa plástica de 60 mL. A ligação entre a espiral e a célula eletrométrica é realizada por meio de um tubo de polietileno flexível de 2 mm de diâmetro (tipo espaguete), que permaneceu fixo a uma estaca colocada junto ao extrator.

Nessas amostras de solução do solo foram analisadas o pH e o Eh (potencial redox) no local da coleta, imediatamente após a amostragem, com eletrodos específicos combinados, ligados a um potenciômetro, e previamente

instalados na célula eletrométrica construída em vidro. Dessa forma, foi possível minimizar o contato das amostras de solução com o oxigênio molecular, evitando sua oxidação. O Eh medido foi corrigido com base no potencial padrão do eletrodo de referência (AgCl), conforme a seguinte equação:

$$Eh = Eh_{\text{medido}} + 220 \text{ mV} \quad (\text{Equação 4})$$

Após as determinações eletroquímicas, as amostras foram filtradas com filtro milipore de 0,45 μm , transferindo-se aproximadamente 30 mL de solução para frascos de vidro contendo 1 mL de HCl em concentração estabelecida para que a concentração final da amostra seja próxima a 0,1 mol L⁻¹.

A análise química das amostras de solução do solo foram feitas posteriormente, no laboratório de Química do Solo, do Departamento de Solos da UFPel, quantificando-se os teores de nitrato (NO_3^-), manganês (Mn^{2+}) e ferro (Fe^{2+}), seguindo métodos descritos em Tedesco et al. (1995).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Variação temporal dos fluxos de CH₄ e N₂O nos períodos de entressafra e de safra da cultura de arroz irrigado

6.1.1 Período de entressafra do arroz (outono/inverno de 2012)

No período de outono/inverno (entressafra do arroz), os fluxos de metano (CH₄) do solo (Fig. 1) foram semelhantes, independentemente da época, das operações de preparo do solo e do manejo da palha. Pode-se observar, ainda, que as emissões variaram pouco no tempo, sendo praticamente nulas em todo o período de avaliação e os poucos picos de emissão foram de baixa magnitude.

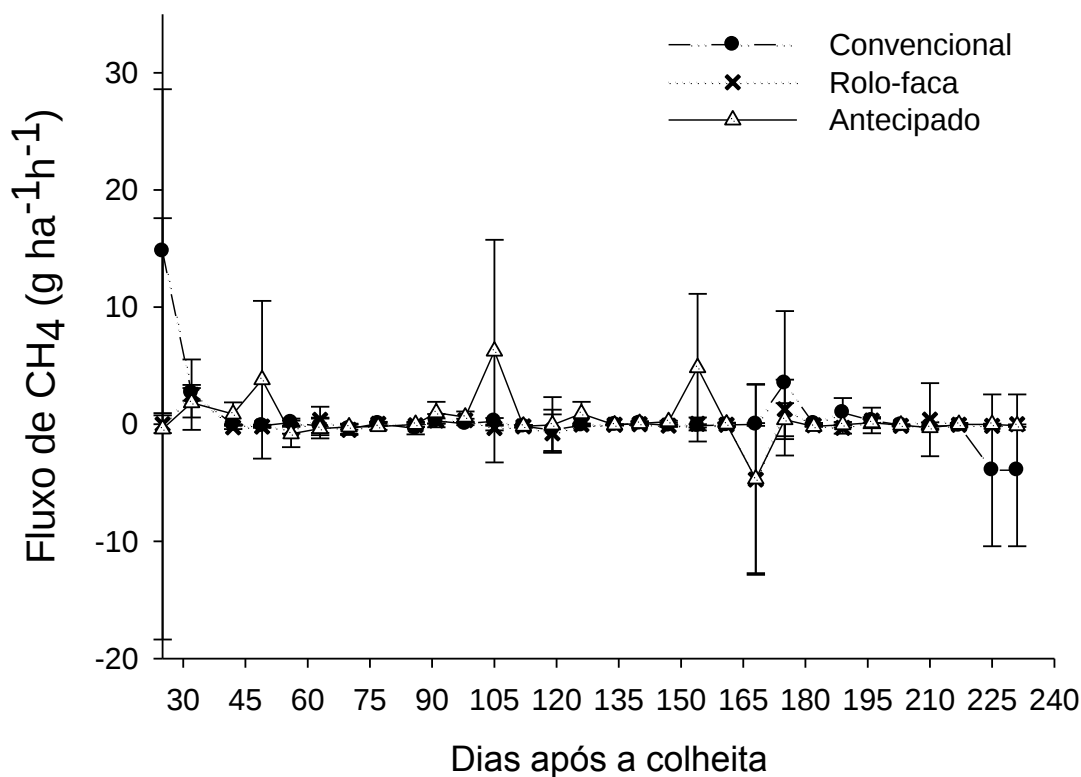


Figura 1. Fluxos de CH₄ em área de cultivo de arroz irrigado, no período de entressafra, sob diferentes sistemas de preparo do solo.

A baixa emissão de metano no período avaliado, em todos os tratamentos, pode ser atribuída ao não estabelecimento de períodos prolongados sob condições de anaerobiose no solo, uma vez que a emissão desse gás de efeito estufa resulta da metanogênese, processo esse desencadeado sobre condições estritamente anaeróbicas (PONNAMPERUMA, 1972).

Em condições de anaerobiose do solo ocorrem alterações eletroquímicas, uma delas é o processo de redução do solo, que desencadeia a metanogênese e ocorre em potenciais de oxirredução geralmente ao redor de -150mV (WANG et al., 1993) e -200mV (SILVA et al., 2011). Em lavouras de arroz irrigado por inundação, por exemplo, as emissões mais expressivas de metano iniciam aproximadamente quatro a cinco semanas após a irrigação da lavoura, quando os potenciais de oxirredução se estabilizam, o que demonstra a necessidade de um período mais longo de redução, para que ocorra o processo de metanogênese.

A ausência de anaerobiose prolongada no solo deve-se a condições atípicas de precipitação no outono-inverno de 2012, caracterizada por baixa precipitação, especialmente no outono, e distribuição regular com apenas alguns eventos de precipitação elevada durante o inverno (Fig. 2). Desta forma os períodos de tempo em que o solo esteve saturado foram relativamente curtos, não sendo, portanto, estabelecidas condições suficientes e adequadas à emissão de metano (Fig. 1), o que fez com que as emissões de CH_4 se comportassem de forma semelhante às de solos não hidromórficos, compatíveis aos valores observados por Bayer et al. (2012), onde os fluxos de CH_4 foram praticamente nulos na maior parte das avaliações.

O maior pico de emissão de CH_4 foi observado no tratamento com preparo convencional, onde no período de entressafra a área não foi manejada, com valores de $14,76 \text{ g de } \text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ aos 25 dias após a colheita (Fig. 1). Embora tenha sido observado, que até os 25 dias após a colheita, praticamente não houve precipitações, o pico de emissão de CH_4 pode ser explicado pelo fato de que, simulando o que ocorre nesse sistema de manejo em lavouras de arroz, não foi estabelecido nenhum preparo ou sistema de drenagem na área experimental após a colheita do arroz, dificultando o escoamento da água remanescente do cultivo do arroz. A manutenção do solo em presença de lâmina de água e/ou saturado por um período mais prolongado após a colheita resulta em condições que predispõem a emissão de metano do solo.

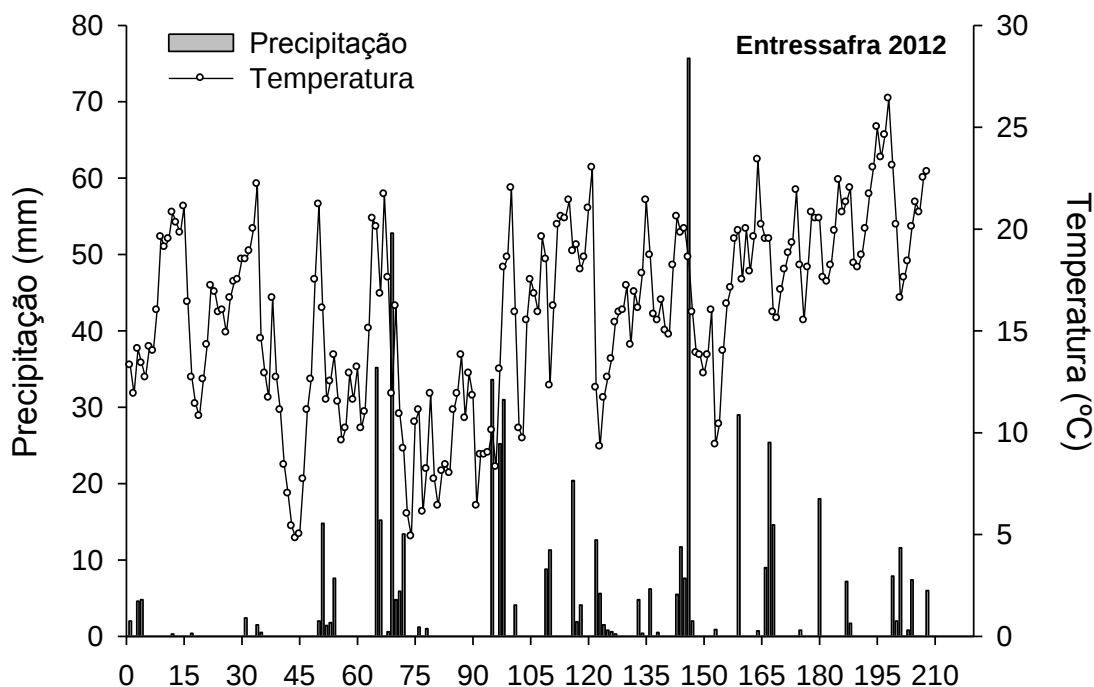


Figura 2. Precipitação pluviométrica e temperatura média do ar, registradas durante o período de entressafra (abril a novembro de 2012) da cultura do arroz irrigado.

Foram observados, também, alguns picos de CH_4 de menor intensidade (Fig. 1) no tratamento com preparo antecipado do solo, de aproximadamente 3,8; 6,24 e 4,24 g de $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivamente, aos 49, 105 e 154 dias, após a colheita do arroz. Esses picos de emissão de CH_4 podem estar associados a eventos de chuva (Fig. 2), mais intensas e acumulados nesses períodos, pois foram observados eventos de precipitações de aproximadamente 292 mm acumulados, entre os 91 e 154 dias após a colheita, ocorridos de forma regular, o que provavelmente desencadearam maiores umidades e condições de anaerobiose, predispondo a metagênese. O tratamento rolo-faca não apresentou emissão de metano do solo durante as avaliações na entressafra.

Cabe salientar que as emissões de CH_4 são favorecidas pela anaerobiose do solo associada a uma fonte de carbono lábil. Com base nisso, os sistemas de preparo antecipado e manejo da palha com rolo-faca, que incorporam a palha de formas distintas na entressafra e que incluíram a drenagem da área, associados a condições de aerobiose do solo, decorrentes das condições de precipitação observadas nesse período, favoreceram a decomposição dos resíduos e oxidação

do carbono de forma preferencialmente aeróbica. Zchornack (2011) sugere que a realização antecipada das operações de preparo com incorporação (outono/inverno) resulta na decomposição dos resíduos do arroz numa condição de solo mais aerado, o que repercute em maiores emissões de CO_2 do solo em virtude de sua condição oxidada.

As taxas de emissão de óxido nitroso (N_2O) do solo apresentaram variações maiores que as de CH_4 durante a entressafra do arroz. Na Fig. 3 pode-se observar que os três tratamentos de manejo apresentaram picos positivos de emissão durante o período avaliado alternado a fluxos negativos (sequestro). Os tratamentos com preparo antecipado e manejo da palha com rolo-faca, que sofreram algum tipo de manejo do solo e da palha no outono, apresentaram comportamento semelhante nos picos de emissão de óxido nitroso, ou seja, a variação temporal nos dois sistemas de preparo do solo foi semelhante, apresentando picos de emissão de N_2O ao mesmo tempo e magnitudes muito próximas. Liu et al. (2010) também observaram picos de emissão N_2O no período da entressafra de cultivo de trigo, variando de aproximadamente 50 a $100 \text{ ug m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

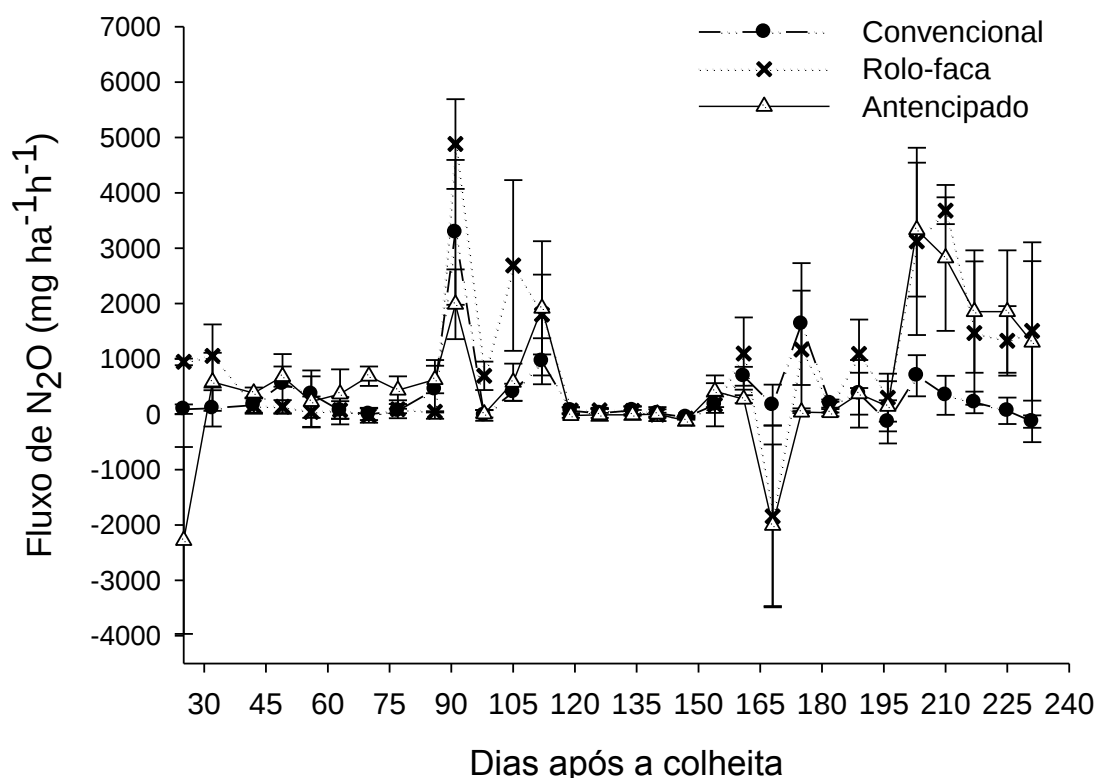


Figura 3. Fluxos de N_2O em área de cultivo de arroz irrigado, no período de entressafra, sob diferentes sistemas de preparo do solo.

Os fluxos de N_2O , independentemente do preparo do solo, apresentaram comportamento semelhante dos 25 aos 91 dias, sendo que aos 91 dias após a colheita ocorreu o primeiro pico mais expressivo, de magnitude 3285, 4881 e 1986 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O , para os tratamentos convencional, rolo-faca e antecipado, respectivamente. Nessa ocasião, ocorreram, ainda, os maiores fluxos emitidos pelos dois primeiros tratamentos (Fig. 3).

Posteriormente, o tratamento convencional apresentou pequenas variações, com outros dois picos de emissão aos 115 e 175 dias, de 958,07 e 1630,4 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O , respectivamente. As maiores emissões de N_2O na entressafra foram determinadas para os tratamentos rolo-faca e preparo antecipado, que assemelharam-se em magnitude e na variação temporal. Após o primeiro pico, aos 91 dias após a colheita do arroz, o tratamento rolo-faca apresentou outros sete picos de emissão, de intensidade variável: 2687,1; 1800,3; 3122,0; 3676,7; 1468,7; 1326,6 e 1506,3 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O , respectivamente, aos 105, 112, 203, 210, 217, 225 e 231 dias.

Já o tratamento preparo antecipado apresentou após o pico aos 91 dias fluxos ainda maiores aos 112, 203, 210, 217, 225 e 231 dias após a colheita do arroz, com intensidade de 1913,8; 3334,7; 2823,7; 1854,8; 1854,8 e 1302,4 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O , respectivamente.

O tratamento rolo-faca apresentou os maiores fluxos (Fig. 3), com valores de até 4881,0 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O aos 224 dias após a colheita, seguido pelo preparo antecipado que, aos 203 dias após a colheita, apresentou fluxos de 3334,7 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O . Esses valores representam uma emissão de aproximadamente 21 e 5 vezes superior do que a determinada para o tratamento com manejo convencional (63,4 e 697,0 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O), o qual não foi submetido a qualquer operação de preparo do solo e da palha no outono/inverno.

Nesse estudo, pode-se perceber uma maior emissão de N_2O nos sistemas com algum revolvimento do solo e a incorporação da palha no outono, ou seja rolo-faca e preparo antecipado, o que pode ser resultado de uma combinação de fatores, uma vez que a emissão de N_2O está associada às condições climáticas, particularmente a umidade e a temperatura, ao conteúdo de N e C disponível no solo e à atividade dos micro-organismos responsáveis pelos processos de nitrificação e desnitrificação (PINTO et al., 2004). Souza (2013), ao avaliar os fluxos de N_2O no período da entressafra da cultura do arroz, observou que os maiores fluxos

ocorreram após a adição e/ou incorporação da palha de arroz ao solo, sendo diretamente proporcionais às quantidades de palha adicionada.

Os picos de emissão de N_2O na entressafra do arroz nos tratamentos onde houve manejo do solo e da palha também foram acompanhados de eventos de precipitação (Fig. 2), embora esses não tenham totalizado grandes volumes. A distribuição adequada da precipitação favorece a alternância de ciclos de umedecimento e secagem do solo e, conseqüentemente, alternância de condições anaeróbicas e aeróbicas, que resultam nos processos de nitrificação e desnitrificação, que têm como produto intermediário o óxido nitroso (REDY & DELAUNE, 2008). Segundo Zheng (2000), a umidade do solo é o fator mais sensível para regular a emissão de N_2O . Ao avaliar as emissões de N_2O do solo, em áreas cultivadas tipicamente com arroz inundado na China, o autor observou que 79% das emissões são causadas por eventos de chuva. A emissão de N_2O máximo causado por chuvas geralmente acontece no segundo dia após sua ocorrência.

6.1.2. Período de cultivo do arroz (safra 2012/2013)

Os fluxos de CH_4 do solo durante o período de cultivo do arroz, nas áreas sob diferentes sistemas de preparo do solo (Fig. 4), de maneira geral, foram semelhantes do 1º ao 77º dia após a semeadura do arroz (DAS), exceção da ocorrência de um pico de emissão, no tratamento com preparo antecipado, no 1º DAS, o qual provavelmente esteve associado ao revolvimento superficial do solo alguns dias antes da semeadura do arroz, visando viabilizar essa operação e a emergência das plântulas de arroz. Isso pode estar relacionado a um possível rompimento da estrutura do solo, liberando o CH_4 eventualmente contido no espaço poroso (PIVA, 2010).

Do 1º ao 44º DAS, as emissões oscilaram entre fluxos negativos e positivos, com valores próximos à zero para os três tratamentos avaliados, com exceção do pico mencionado anteriormente. Posteriormente, os fluxos (Fig. 4) aumentaram até o 63º DAS, para os três tratamentos avaliados, diferenciando-se, entretanto, quanto à magnitude, e depois se mantiveram em valores elevados de emissão até os 77 DAS. Nesse período, dos 63 aos 77 DAS, o tratamento com preparo antecipado oscilou as emissões entre 259,7 g de CH_4 $ha^{-1} h^{-1}$, o maior pico observado nesse tratamento, e 136,5 g de CH_4 $ha^{-1} h^{-1}$. No tratamento rolo-faca, ocorreu a mesma dinâmica, onde

após apresentar seu maior pico de emissão, de aproximadamente 192,4 g de CH_4 $\text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ aos 63 DAS, permaneceu oscilando com valores mínimos de 172,1 g de CH_4 $\text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$. Já no tratamento com preparo convencional, as emissões seguiram aumentando até os 77 DAS, aonde chegou ao seu maior pico de emissão com um valor de 256,1 g de CH_4 $\text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$.

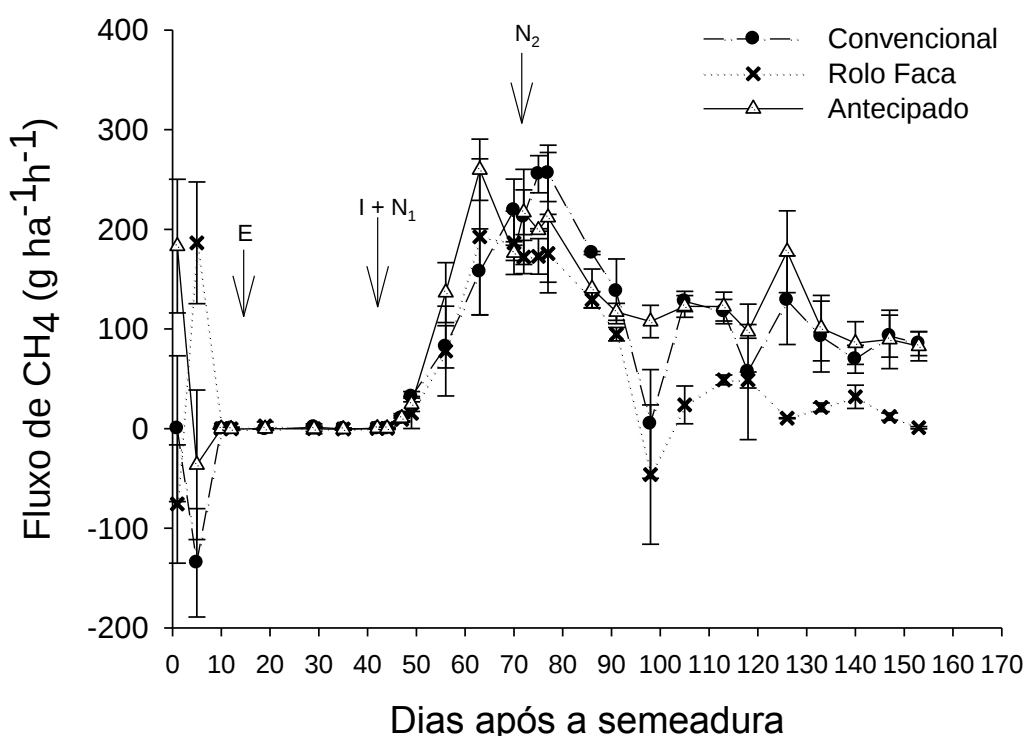


Figura 4. Fluxos de CH_4 durante o cultivo do arroz irrigado por alagamento, no período de safra, sob diferentes sistemas de preparo do solo. E = emergência do arroz; I + N_1 = início da irrigação e 1ª adubação nitrogenada em cobertura; N_2 = segunda adubação nitrogenada em cobertura.

Na Fig. 4 pode-se observar que o início do alagamento do solo e a 1ª adubação nitrogenada em cobertura ocorreram aos 43 DAS, e que o início de quantidades significativas de metano ocorreu apenas alguns dias após este período (47 DAS). Os picos de emissão de CH_4 que ocorreram próximos à 2ª adubação nitrogenada de cobertura (70 DAS) coincidiram com o final da fase vegetativa do arroz e início da fase reprodutiva. O período de maior emissão de metano ao longo do cultivo de arroz foi dos 63 aos DAS, estando a dinâmica dos fluxos associada a vários fatores, como, potencial de oxirredução, planta de arroz, aos sistemas de preparo do solo e manejo da cobertura vegetal, entre outros.

Com os aumentos expressivos dos fluxos de CH_4 também determinaram-se as maiores concentrações de Mn^{2+} e Fe^{+2} na solução do solo (Fig. 5c,d), medidas após a inundação do solo. Isso indica que o início das emissões de CH_4 ocorreu após as reduções sequenciais do Mn^{4+} e Fe^{3+} , acompanhando o processo de redução do solo, que é medido pelo potencial redox (Eh) (SOUSA et al., 2008). Buss (2012) também observou que o aumento expressivo nas emissões de CH_4 em área cultivada com arroz irrigado esteve associado a maiores teores de Mn^{2+} e Fe^{+2} na solução solo, após o processo de redução dos óxidos. Valores de Eh variando entre 127 e 147 mV (Fig. 5a) coincidiram com o início de emissão expressiva de CH_4 do solo, assim como com os maiores valores (picos) de emissão de CH_4 observados durante o cultivo do arroz, já os valores de pH (Fig. 5b) não apresentaram relação com as emissões. Segundo Yu & Patrick Jr. (2004), a faixa de Eh de solos alagados em que o PAG associado ao CH_4 é mais elevado situa-se entre -200 e -300mV.

Os tratamentos preparo antecipado e rolo-faca apresentaram seus maiores picos de emissão (Fig. 4), antes do preparo convencional. Maiores quantidades de matéria seca foram observadas no sistema de preparo antecipado e manejo da palha com rolo-faca antecedendo a semeadura, 5848 kg ha⁻¹ e 3219 kg ha⁻¹, respectivamente, enquanto no sistema de preparo convencional foram observados 2931 kg ha⁻¹. O aporte de resíduos ao solo pode favorecer o processo de redução, por fornecer fonte de carbono lábil aos micro-organismos (WANG et al., 1999) e valores negativos de Eh podem ser atingidos em duas semanas de alagamento (SOUSA et al., 2010).

Porém, com poucos dias de alagamento as emissões de metano começaram a se pronunciar, o que não é comum, mesmo em quantidades de resíduo orgânico elevados aportados ao solo. Na Fig. 6, podem ser observadas as precipitações ocorridas em 20 dias, ocorrendo um acumulado de aproximadamente 168 mm, e uma precipitação elevada em dois dias anteriores à coleta, de aproximadamente 40 mm que pode ter contribuído para as emissões de metano uma vez que o solo provavelmente ficou sob condições de anaerobiose.

De forma geral, os maiores picos de CH_4 (dos 63 aos 77 DAS) (Fig. 4), estão associados principalmente à incorporação de matéria seca ao solo (Souza, 2013), uma vez que esse processo favorece a redução do solo e promove a incorporação de C lábil (resíduos) no solo para a metanogênese (SHAN et al., 2008). Costa (2005) também verificou um aumento dos fluxos de CH_4 a partir da irrigação e maior fluxo

de CH_4 durante a fase vegetativa do arroz, associando-o, principalmente, à dinâmica de fornecimento de C para a metanogênese. Segundo Aulakh et al. (2001), o aumento da produção de CH_4 pode também estar associado à liberação de exsudatos pelas raízes das plantas de arroz, que ocorrem principalmente durante o início da fase reprodutiva e servem de substrato para os organismos metanogênicos.

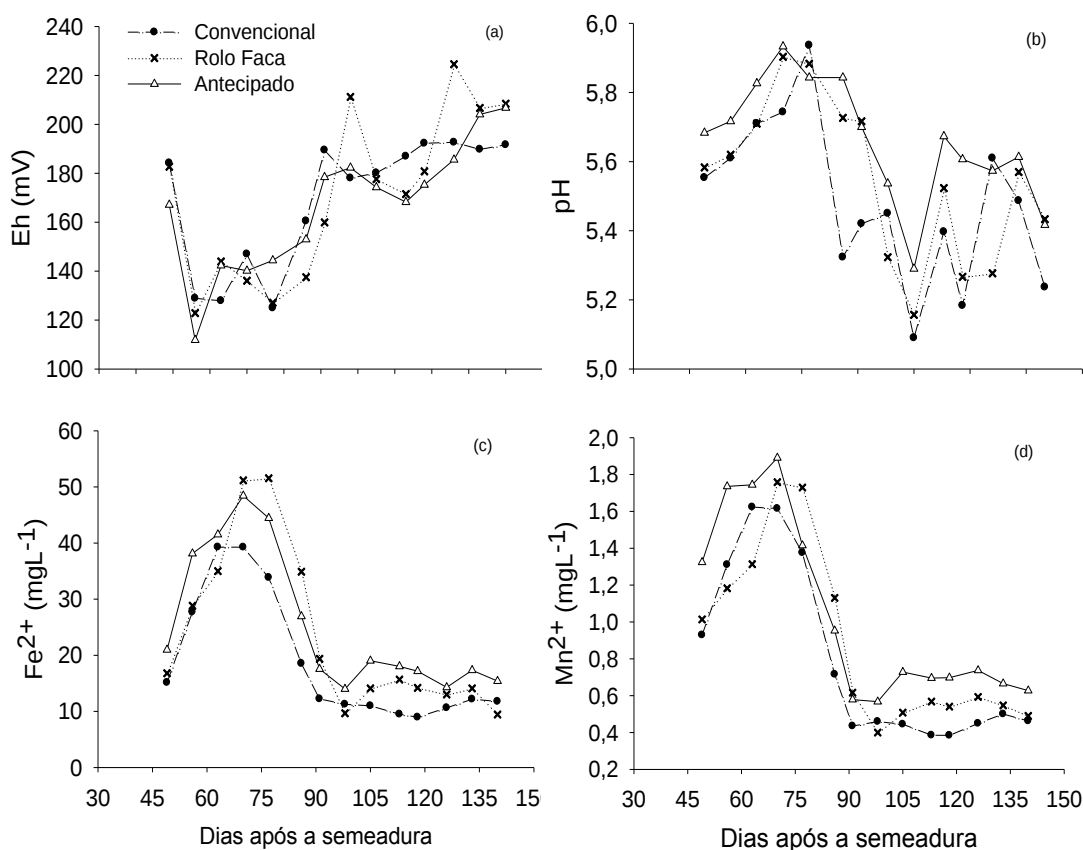


Figura 5. Valores de Eh (a) e pH (b) e teores de Fe^{2+} (c) e de Mn^{2+} (d) da solução do solo em Planossolo cultivado com arroz sob irrigação e diferentes sistema de preparo do solo.

A partir do 77º até o 98º DAS, os fluxos de metano (Fig. 4) decresceram, atingindo seus valores mínimos nos diferentes tratamentos. Posteriormente, os fluxos mantiveram-se aproximadamente constantes até o final do ciclo, com apenas pequenas oscilações nos valores de emissão. A partir dos 98 DAS, o tratamento com preparo antecipado apresentou os maiores fluxos, variando de 82,7 a 122,6 g de $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Por outro lado, o tratamento rolo-faca promoveu os menores fluxos, chegando a apresentar valores negativos, - 46,1 a 48,9 g de $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

A manutenção da emissão de metano até o final do período de cultivo do arroz determinada neste estudo deve estar associada ao fato de não se ter drenado a lavoura para a colheita, operação normalmente realizada em lavouras comerciais e que condiciona a oxidação gradativa do solo e, conseqüente, redução nos fluxos de CH_4 . Segundo Hou et al. (2000), a drenagem da água pode provocar redução drástica nas emissões de CH_4 em lavouras de arroz, as quais podem atingir valores próximos à zero inclusive. A manutenção dos fluxos também pode estar atrelada a fatores relacionados à própria planta. Segundo Watanabe et al., 1999, a partir da fase reprodutiva, as folhas mortas que caem sobre o solo formam liteira, o mesmo ocorrendo com os perfilhos que não produziram panícula e as raízes senescentes e/ou mortas das plantas de arroz, em adição aos exsudatos radiculares, todos esses componentes passam a ter significativa participação no fornecimento de C aos organismos metanogênicos.

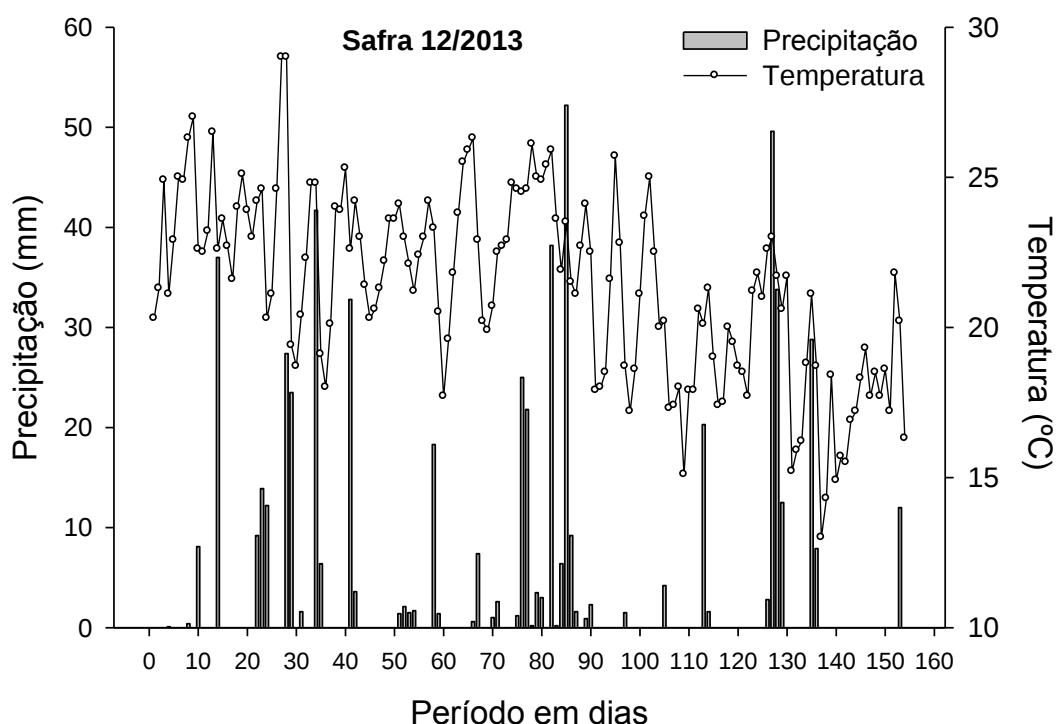


Figura 6. Precipitação pluviométrica e temperatura média do ar, registradas durante o período de safra (novembro a abril) da cultura do arroz irrigado.

As emissões de N_2O durante o período de cultivo do arroz se comportaram de maneira semelhante para os diferentes tratamentos avaliados. Independentemente do tratamento, os maiores fluxos (Fig. 7) ocorreram aos 29 DAS, antecedendo a

primeira adubação nitrogenada em cobertura e o início da irrigação por inundação do solo. O tratamento rolo-faca apresentou o maior fluxo de N_2O , 15258 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O , seguido dos tratamentos preparo antecipado e convencional, com fluxos de 7930 e 2987 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O , respectivamente. Souza (2013) também encontrou maiores picos de emissão de N_2O anteriormente à entrada da água na lavoura de arroz, atribuindo-os às precipitações ocorridas no dia anterior a coleta, que elevou a umidade do solo.

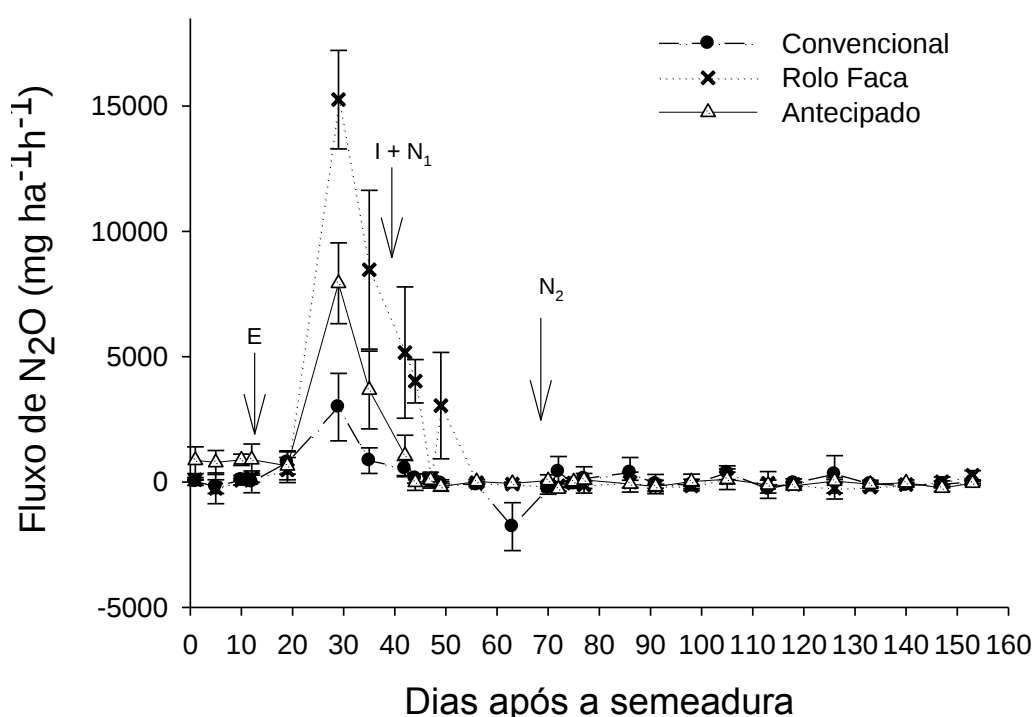


Figura 7. Fluxos de N_2O durante o cultivo do arroz irrigado por alagamento, no período de safra, sob diferentes sistemas de preparo do solo. E = emergência do arroz; I + N_1 = início da irrigação e 1ª adubação nitrogenada em cobertura; N_2 = segunda adubação nitrogenada em cobertura.

A partir dos picos de emissão observados aos 29 DAS, os fluxos de N_2O decresceram gradualmente para os três sistemas de preparo do solo entre o 35º e o 47º DAS.

A dinâmica dos fluxos, após os 19 DAS até os 35 DAS, provavelmente está associada aos eventos de precipitações ocorridos durante esse período. De acordo com os dados de precipitação (Fig. 6), ocorreram eventos de chuva, nos dias 22 e 23 (26mm); 25 e 26 (51mm), 31 (41,7 mm) de dezembro de 2012 e 1º (6,4 mm) e 7 e 8 (36,4 mm) de janeiro de 2013, o que certamente altera a umidade do solo e

promove alternância de ciclos de aerobiose e anaerobiose, favorecendo os processos relacionados a produção de N_2O . Segundo Zheng (2000), a umidade do solo e a temperatura são os principais fatores que determinam o padrão de variação sazonal de emissão de N_2O do solo.

Os processos de nitrificação e de desnitrificação, que geram o N_2O , têm relação direta com o conteúdo de umidade do solo e com ciclos de umedecimento e secagem, pois acarretam alternância desses processos. Segundo Souza (2013) a produção de N_2O durante a nitrificação pode ocorrer quando o espaço poroso ocupado por água (EPSA) estiver na faixa de 30 a 60%, ou seja, é favorecida por condições de aerobiose, além da presença de NH_4^+ e carbono disponíveis. Já o processo de desnitrificação é estimulado quando o solo se encontra com valores de EPSA superiores a 60%, ou seja, em condições de anaerobiose, além de requerer a presença de NO_3^- e carbono disponível.

As adubações nitrogenadas não foram capazes de provocar emissões importantes de N_2O (Fig. 7), diferindo do que foi determinado nos trabalhos de Cai et al. (1997) e Ahmad et al. (2009). Porém, Zschornack (2011) ao avaliar a influência do manejo de solo em arroz irrigado no Rio Grande do Sul também verificou que as aplicações de N (ureia) realizadas durante o cultivo do arroz não promoveram aumento considerável das emissões de N_2O . Liu et al. (2010), ao avaliarem regime de água na emissão de óxido nitroso na China, em sistema de rotação arroz trigo, também não constatarem, incremento nas taxas de emissão de N_2O durante o cultivo do arroz irrigado por inundação contínua, mesmo após aplicações de fertilizante nitrogenado (ureia). Em um sistema de produção de arroz irrigado no RS, a água de inundação é controlada e mantida ao longo da estação de crescimento, com manutenção de lâminas contínuas (EMBRAPA, 2008), o mesmo que ocorreu nesse experimento. O alagamento do solo e a manutenção de uma lâmina de água durante grande parte do ciclo do arroz tendem a suprimir as emissões de N_2O (IIDA et al., 2007; LIU et al., 2010), pela baixa disponibilidade de NO_3^- para a desnitrificação (SOUZA, 2013) decorrentes das condições limitantes de O_2 , e também o N_2O presente no solo é reduzido a N_2 (REDDY & DELAUNE, 2008).

No restante do período de cultivo do arroz, dos 56 aos 153 DAS, os fluxos (Fig. 7) oscilaram entre valores negativos e positivos, apresentando valores positivos de no máximo 373, 269, e 110 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O , e negativos de até -1778, -248 e -273 $\text{mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de N_2O , no sistema de preparo convencional, manejo da palha com

rolo-faca e sistema de preparo antecipado, respectivamente. Buss (2012), em estudo realizado com arroz irrigado por alagamento em Planossolo, observou que os maiores fluxos de N_2O ocorreram nas duas primeiras semanas após o alagamento do solo, atingindo um valor máximo de $1837 \text{ mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1} N_2O$, no período restante de cultivo, as emissões variaram entre fluxos negativos e positivos, de -250 e $428 \text{ mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ de N_2O . Por outro lado, Wesz (2012) determinou valores de emissão de N_2O praticamente nulos em arroz irrigado por alagamento contínuo, com valores variando de -243 a $416 \text{ mg N-N}_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ao longo do ciclo de cultivo.

Como relatado anteriormente, a ocorrência de fluxos de N_2O praticamente nulos normalmente está relacionada à manutenção de uma lâmina de água contínua durante o ciclo do arroz, a qual não é favorável às emissões de N_2O (IIDA et al., 2007; LIU et al., 2010), visto que as condições de anaerobiose presentes tendem a reduzir o N_2O presente no solo à N_2 (REDDY E DELAUNE, 2008; AHMAD et al., 2009).

6.2 Emissão total de CH_4 e N_2O nos períodos de entressafra de 2012 e de safra 2012/2013

Na Fig. 8 é possível observar que as emissões de CH_4 se concentraram no período de safra, representando mais de 99% das emissões totais anuais (safra + entressafra) de CH_4 , para os três tratamentos avaliados.

As emissões totais de CH_4 durante o período de entressafra 2012 foram muito baixas (Fig. 8), sendo que os maiores valores foram observados nos sistema com preparo antecipado, de $2,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de CH_4 e convencional, de $1,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de CH_4 . O tratamento rolo-faca apresentou fluxo negativo.

Os trabalhos que abordam a dinâmica da emissão de metano pós-colheita do arroz (entressafra) em sistemas de manejo que incorporam a palha, como o preparo antecipado e rolo-faca, que manejam o solo e a palha no outono-inverno comumente relatam emissões totais de CH_4 baixas, porém com valores superiores aos encontrados nesse trabalho. Souza (2013), ao avaliar sistemas de preparo do solo, determinou valores de emissão total de CH_4 (Fig. 8) de 19,6 e $8,7 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ para manejos que incorporaram a palha logo após a colheita do arroz, como os manejos com rolo-faca e o manejo com grade, como o preparo antecipado. De maneira geral, a incorporação de resíduos culturais aumenta as emissões desse gás

(LE MER & ROGER, 2001), por consistir em aporte de C (NASER et al., 2007), que é fonte de carbono para a metanogênese.

A quantidade de substrato orgânico é um dos principais fatores que condicionam a produção de CH_4 . Porém, esse aspecto deve estar associado a condições anaeróbicas do solo, as quais estimulam e são necessárias para a produção e a emissão de CH_4 (DALAL et al., 2008). Esta segunda condição não ocorreu de forma sistemática no período de entressafra avaliado, pois as precipitações ocorridas durante o período de outono/inverno foram menores que a normal para a região. O período de entressafra de 2012 pode ser comparado ao cultivo do arroz irrigado por aspersão, pela ocorrência eventual de solo saturado. Nesse sistema, Buss (2012) verificou emissões totais de CH_4 praticamente nulas ($0,24 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}$) no mesmo solo do presente estudo.

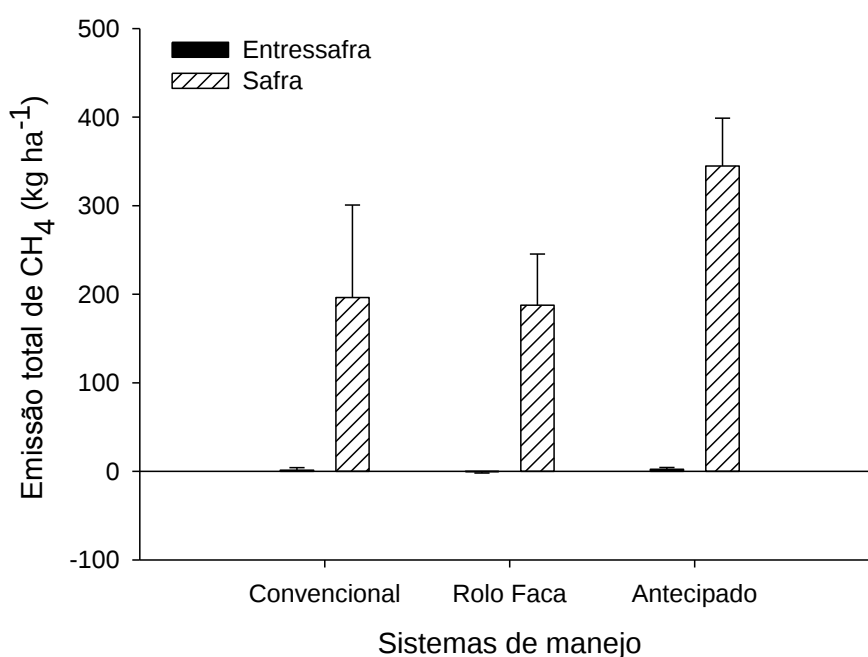


Figura 8. Emissão total de CH_4 em área de cultivo de arroz irrigado por alagamento, sob diferentes sistemas de preparo do solo, durante o período de entressafra e de safra.

Quanto ao período de safra 2012/2013 (Fig. 8) o sistema de preparo antecipado foi responsável pelas maiores emissões acumuladas de CH_4 , $344,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de CH_4 , o que representa 83% e 45% a mais do que o total emitido pelos

sistemas de preparo convencional e de manejo da palha com rolo-faca, que apresentaram emissões de 57,7 e 187,6 kg ha⁻¹ de CH₄, respectivamente.

As maiores emissões de metano verificadas no sistema de preparo antecipado podem estar associadas à maior quantidade de matéria seca incorporada à camada superficial do solo em pré-semeadura do arroz, aliada ao fato de que não se sabe quanto da resteva do cultivo antecedente incorporada na entressafra não havia sido decomposta e apresentava, portanto, potencial de emissão de metano. Foram observados nesse tratamento 5848 kg ha⁻¹ de matéria seca, oriunda de vegetação espontânea desenvolvida no outono/inverno, contra 3629 e 2917 kg ha⁻¹, determinada para os tratamentos rolo-faca e convencional, respectivamente.

As emissões totais de metano determinadas neste estudo são próximas às observadas por Souza (2013), que verificou emissões totais de até 414,6; 334,5 e 464,4 kg ha⁻¹ de CH₄, respectivamente em sistemas de manejo semelhantes aos citados anteriormente, manejo da palha com rolo-faca logo após a colheita, preparo do solo com grade no pós-colheita e sistema de preparo convencional, em agosto, porém esses valores foram inferiores aos valores observados, 586 kg ha⁻¹ de CH₄, nos tratamentos com ausência de qualquer preparo do solo e manejo da palha, semelhantes ao sistema de plantio direto.

As menores emissões totais de CH₄ atribuídas ao sistema rolo-faca, que incorpora a palha imediatamente após a colheita do arroz podem estar associadas às menores quantidades de matéria seca remanescente sobre o solo. Nesse sentido, Zschornack (2011) relatou que a incorporação antecipada da palha do arroz (outono/inverno) favorece a decomposição dos resíduos do arroz em condição de solo oxidado, proporcionando maior emissão de CO₂ do solo. Por outro lado, isso reduz a quantidade de C disponível para a metanogênese durante a safra de arroz subsequente (primavera/verão).

Das emissões totais de CH₄ (Fig. 8), contabilizando as emissões médias anuais de cada período, entressafra 2012 e safra 2012/2013, pode-se observar que o período de cultivo do arroz irrigado foi responsável por praticamente toda a emissão do CH₄, 99,5%, enquanto que o período de entressafra respondeu por apenas 0,5%. Souza (2013) também observou que o período de cultivo é responsável pela maior parcela do total das emissões de CH₄ anuais, (98%), contra apenas 2% do total de CH₄ emitido na entressafra.

Quanto às emissões totais de N_2O (Fig. 9), os sistemas que promovem a incorporação da palha no outono/inverno (preparo antecipado e rolo-faca) foram responsáveis pelas maiores emissões, tanto no período da entressafra, como durante o período de cultivo do arroz.

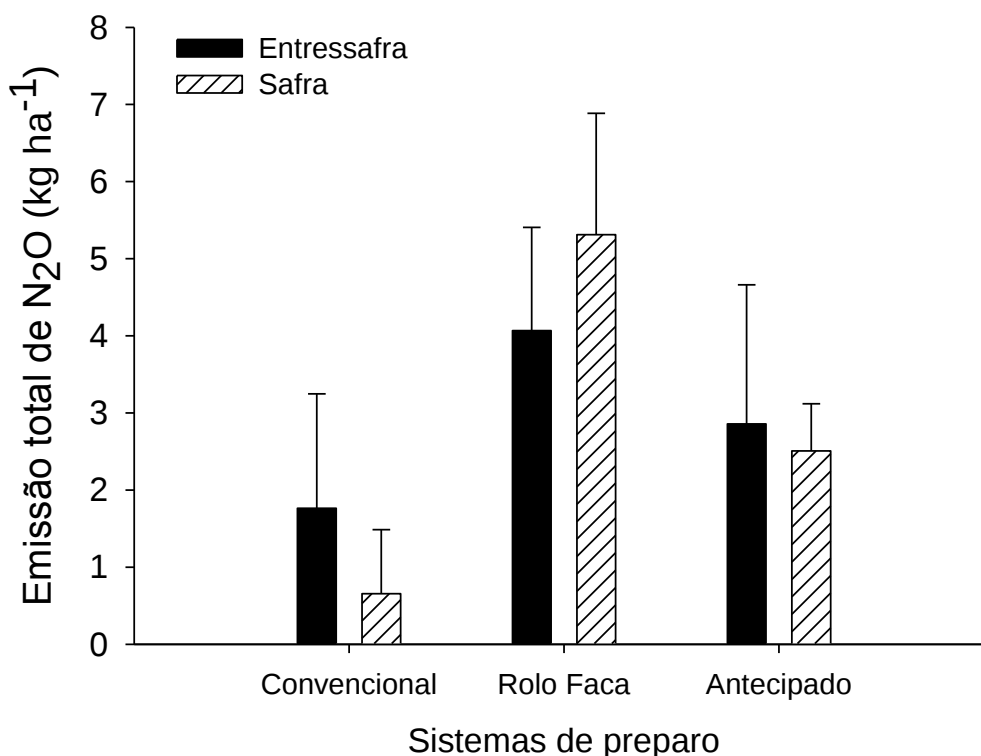


Figura 9. Emissão total de N_2O em área de cultivo de arroz irrigado por alagamento, sob diferentes sistemas de preparo do solo, durante o período de entressafra e de safra.

No período de entressafra (Fig. 9), o sistema de manejo rolo-faca apresentou as maiores emissões total de N_2O ($4,0 \text{ kg ha}^{-1} N_2O$), seguido do preparo antecipado ($2,8 \text{ kg ha}^{-1} N_2O$), que representou 30% a menos, e do sistema de preparo convencional ($1,7 \text{ kg ha}^{-1} N_2O$), com uma emissão menor, 57% a menos que o manejo da palha com rolo-faca e 39% a menos que o sistema de preparo convencional.

As emissões acumuladas de N_2O durante o período de cultivo (Fig. 9) foram em média maiores no solo sob o tratamento rolo-faca. A ordem de grandeza das emissões de N_2O foi de: rolo-faca ($5,3 \text{ kg ha}^{-1} N_2O$) > preparo antecipado ($1,8 \text{ kg ha}^{-1} N_2O$) > preparo convencional ($0,6 \text{ kg ha}^{-1} N_2O$). O sistema de manejo da palha rolo-

faca foi superior, em emissão total de N_2O , aos demais sistemas de preparo do solo em 66% e 88%, respectivamente.

De uma maneira geral, as elevadas emissões totais de N_2O no período de cultivo do arroz (Fig. 9) estão associadas aos valores de fluxos observados no período compreendido entre o 19º e o 44º DAS, como relatado anteriormente, especialmente em um pico aos. Provavelmente esse comportamento esteja associado, especialmente aos eventos de precipitação frequentes ocorridas nesse período (Fig. 6) e as maiores quantidades de material vegetal em superfície e/ou parcialmente incorporado, uma vez que os sistemas de preparo com rolo-faca e antecipado tiveram maiores emissões em comparação ao sistema de preparo convencional. Segundo Zheng et al. (2000), a umidade do solo é o principal fator regulador da emissão de N_2O . Segundo Ma et al. (2009), quando o resíduo é mantido na superfície do solo, a presença do oxigênio nessa camada pode estimular o processo de nitrificação e inibe a redução do N_2O a N_2 , repercutindo no aumento das emissões de N_2O do solo.

Nesse estudo, pode-se observar que os dois períodos avaliados (entressafra e safra) contribuíram equitativamente pelas emissões totais de N_2O . No sistema de preparo convencional e antecipado, a maior parte das emissões, foi observada durante o período de entressafra, e representam 53% e 61% do total de N_2O emitido (2,3 e 4,6 kg de N_2O ha⁻¹), respectivamente. Já no sistema de manejo da palha com rolo-faca, o período de safra contribui com as maiores emissões, 57% das emissões totais de N_2O (9,3 kg de N_2O ha⁻¹). Wei et al. (2007) verificaram que o período de cultivo foi responsável por 40% a 50 % do N_2O emitido anualmente. As elevadas emissões de N_2O no período de safra, especialmente com um pico de emissão aos 29 DAS (Fig. 9), contribuíram para que o período de safra seja o principal responsável pelas emissões de N_2O .

6.3 Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp)

Na tab. 1, são apresentadas as contribuições dos gases de efeito estufa CH_4 e N_2O para o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) associado aos diferentes sistemas de manejo do solo e da palha. Considerando-se o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) anual (safra + entressafra), observa-se que o período de cultivo do arroz irrigado (safra) contribuiu com a maior parcela do total,

correspondendo a 84%, 93% e 91%, respectivamente, para os sistemas com uso de rolo-faca, preparo antecipado e convencional. Esses valores foram determinados considerando-se a emissão total acumulada de CH₄ e de N₂O, convertida em equivalente de CO₂, ou seja, multiplicando-se os totais desses gases por 25 e 298, respectivamente (FORSTER et al., 2007).

Tabela 2. Contribuição dos gases CH₄ e N₂O para o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) nos períodos de entressafra, safra e anual, para os sistemas de preparo antecipado, rolo-faca e convencional.

Tratamento	PAGp (kg CO ₂ equiv. ha ⁻¹)					%	
	Total Anual	Entressafra		Safra		Entressafra	Safra
		CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O		
Preparo Convencional	5661	33	526	4906	195	7	93
Rolo Faca	7485	0	1211	4690	1582	16	84
Preparo Antecipado	10276	58	851	8619	746	9	91

No período de entressafra, o N₂O foi responsável pela quase totalidade do PAGp observado (Fig. 10a), superando a marca de 90% nos três tratamentos avaliados. Souza (2013) também observou maiores contribuições do N₂O para o PAGp na entressafra, em todos sistemas de manejo que avaliou no pós-colheita. Segundo Pinto et al., (2004) a disponibilidade de substrato para os processos microbianos e a dinâmica da umidade do solo, onde as condições de aerobiose do solo permitem que os processos de nitrificação e desnitrificação ocorram, produzem maiores quantidades de N₂O e consequentemente maiores PAGp.

Na Fig. 10b, pode-se observar que durante o período de cultivo do arroz, o efeito do CH₄ foi preponderante, respondendo por 96%, 66% e 91% do PAGp, respectivamente, para os sistemas de preparo convencional, rolo-faca e antecipado. Buss (2012) também observou, no cultivo do arroz sob irrigação contínua, especialmente em sistema de preparo convencional, que do PAGp observado, 98% foi na forma de CH₄.

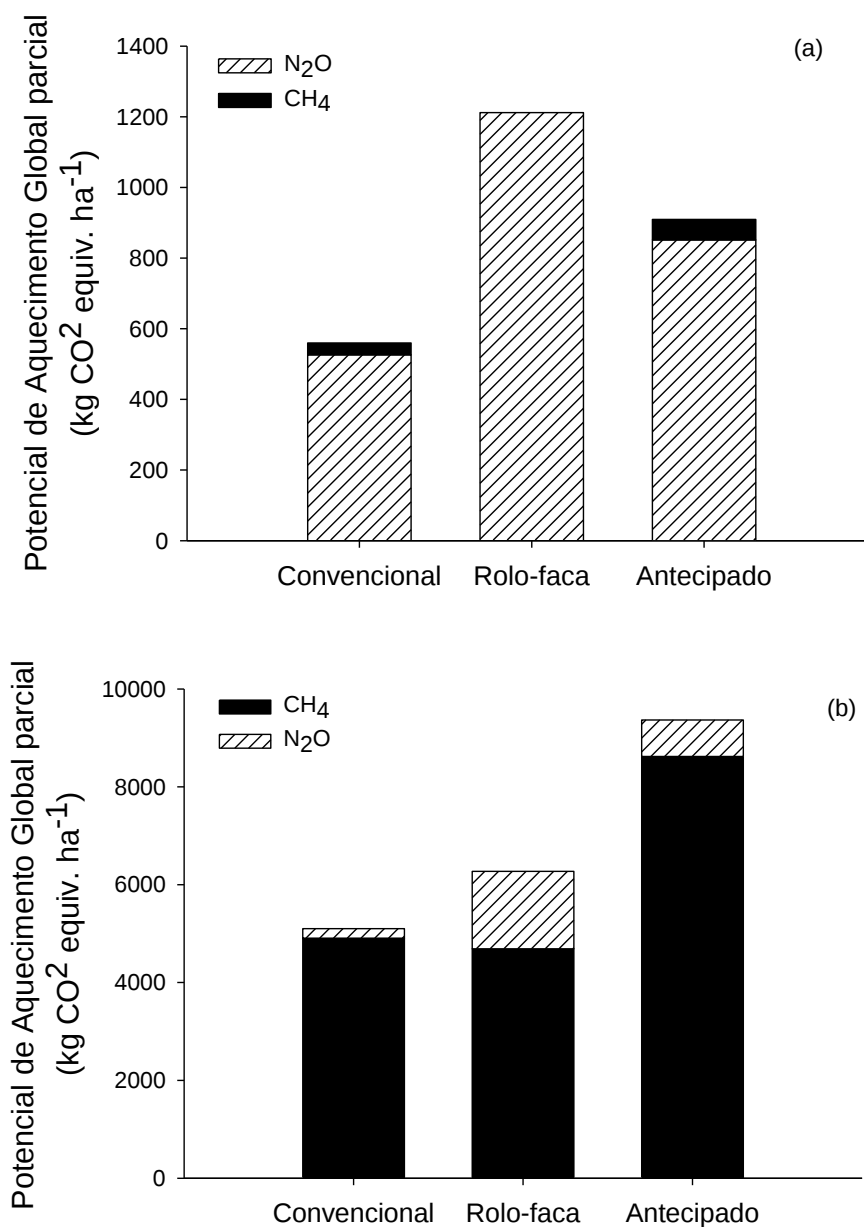


Figura 10. Contribuição do gás N_2O e CH_4 para o potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp), em área de cultivo de arroz irrigado por alagamento, sob diferentes sistemas de preparo do solo, durante o período de entressafra (a) e de safra (b).

Na Fig. 11 é apresentada a comparação dos diferentes manejos do solo e da cobertura vegetal quanto ao PAGp anual (entressafra + safra). O sistema preparo antecipado apresentou maior PAGp anual (10276 kg CO_2 equiv. ha^{-1}) que os demais, ou seja, este foi 45% superior ao do sistema convencional e 27% superior ao do sistema com uso de rolo-faca. O maior PAGp anual do sistema de preparo antecipado decorreu, principalmente, do período de cultivo do arroz (safra),

especialmente das elevadas emissões de CH_4 . Ademais, na safra, o sistema de preparo antecipado também foi o segundo maior emissor de N_2O .

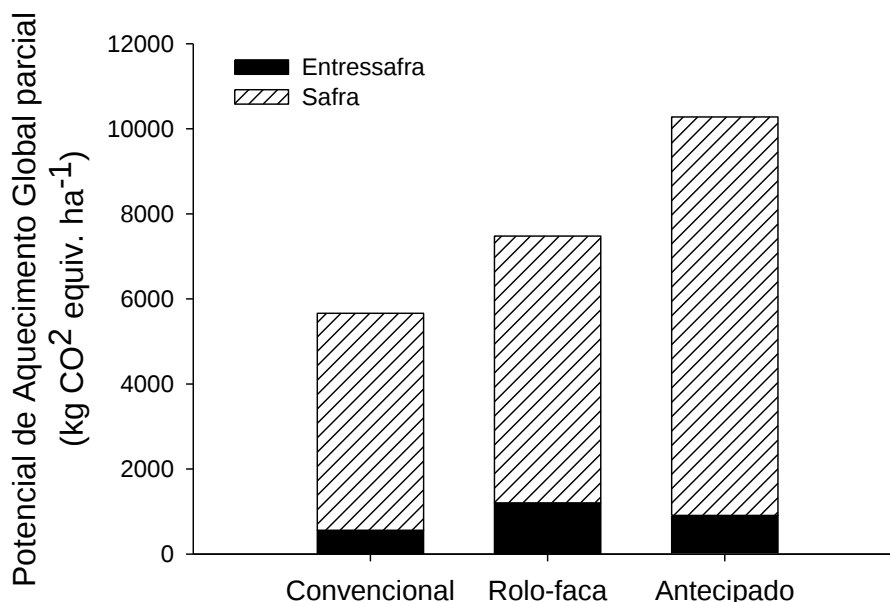


Figura 11. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) em área de cultivo de arroz irrigado por alagamento, sob diferentes sistemas de preparo do solo, durante o período de entressafra e de safra.

Possivelmente esse comportamento esteja relacionado ao fato desse sistema ter contemplado, além de operações de preparo do solo no outono, uma gradagem adicional em pré-semeadura do arroz, incorporando superficialmente toda a cobertura vegetal desenvolvida durante o período de outono/inverno e início da primavera. Especificamente neste estudo, devido ao inverno mais seco, o desenvolvimento de cobertura vegetal na área preparada antecipadamente foi abundante, cerca de duas vezes maior que a massa vegetal determinada na área sob preparo convencional. O preparo antecipado do solo, além de corrigir pequenas imperfeições de microrrelevo, estimula a emergência de vegetação espontânea/plantas daninhas (GOMES et al., 2004), o que acarretou em maiores quantidades de material vegetal nesse sistema quando comparado ao sistema de preparo convencional, que não foi manejado outono/inverno, com rastros de trator e mal drenada, e portanto não desenvolveu muita vegetação espontânea. As emissões de metano durante o cultivo do arroz estiveram fortemente associadas às

quantidades de material vegetal incorporado ao solo no período que antecedeu a semeadura do arroz.

Vale acrescentar, que a operação de preparo do solo na primavera não é prática comum em áreas previamente preparadas no outono/inverno, mas eventualmente é necessária para facilitar a semeadura e garantir o bom estabelecimento do arroz. Esta operação adicional na primavera, associada ao elevado aporte de biomassa vegetal fresca ao solo, possivelmente tenham condicionado as maiores emissões de metano durante o cultivo do arroz associadas ao sistema de preparo antecipado quando comparado ao manejo convencional.

Zschonack (2011) observou que o sistema de preparo convencional apresentou maior PAGp em relação ao cultivo mínimo que foi superior ao do sistema de plantio direto. O PAGp observado nesses sistemas decorre especialmente das emissões de CH₄. Segundo Naser et al., (2007) o aumento da emissão de CH₄ está diretamente relacionado à quantidade de resíduo aportado no solo, ao preparo do solo associado à incorporação desses resíduos, que implica no aumento das emissões de CH₄ em solos mal drenados (MA et al., 2009) e às condições anaeróbicas do solo alagado que estimula a produção e a emissão de CH₄ (DALAL et al., 2008).

O sistema com uso de rolo-faca apresentou PAGp intermediário entre os dois outros sistemas de manejo. Nesse sistema, as emissões totais de N₂O foram maiores que nas áreas sob preparo antecipado e, particularmente, sob preparo convencional. Outro diferencial do sistema com rolo-faca foi que a contribuição do N₂O para o PAGp da safra foi muito superior que a determinada para os demais sistemas (Fig. 11). Adicionalmente, verifica-se que a contribuição do N₂O para o PAGp na área manejada com rolo-faca foi mais próxima nos períodos de entressafra (Fig. 9) e safra (Fig. 10), comparativamente aos demais sistemas. No período de entressafra o PAGp associado ao N₂O foi de 1212 kg CO₂ equiv. ha⁻¹, 30% maior do que o do sistema preparo antecipado e 56% maior do que o do sistema convencional. Já durante o cultivo do arroz, esse foi 53% e 87% maior que o dos sistemas preparo antecipado e convencional.

Os resultados obtidos indicam ser de extrema importância avaliar com cautela o potencial de emissão de GEE de sistemas de manejo do solo e da palha em áreas cultivadas com arroz irrigado, uma vez que a interação entre as práticas de manejo e condições de cultivo e ambientais é que condiciona as emissões de CH₄ e N₂O do

solo ao longo do tempo. Conhecendo-se, pois, a variabilidade das condições ambientais entre locais e no tempo, bem como a diversidade de possibilidades de manejo adotadas em lavouras de arroz no Rio Grande do Sul, depreende-se que existe uma infinidade de possibilidades de resposta em potencial de emissão de CH_4 e N_2O associadas aos diferentes sistemas de manejo, as quais devem ser avaliadas para estabelecer seu potencial mitigador de emissões de gases de efeito estufa.

6.4 Produtividade de grãos de arroz e Índice PAGp anual/PG (Potencial de Aquecimento Global parcial anual (safra e entressafra)/Produtividade de grãos).

A produtividade de grãos (Fig. 12) foi muita similar entre os sistemas de preparo do solo, sendo maior no sistema de preparo convencional (7787 kg ha^{-1}), porém não apresentando diferença estatística, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, entre os tratamentos avaliados. No tratamento rolo-faca a produtividade foi de 7021 kg ha^{-1} e no sistema de preparo antecipado de 6890 kg ha^{-1} . Considerando o potencial produtivo da cultura do arroz e dessa cultivar, observou-se que a produtividade de grãos foi baixa. Essa baixa produtividade ocorreu provavelmente devido a semeadura da cultura ter sido realizada mais tarde do que ocorre na prática, em decorrência de intempéries climáticas, o que atrasou o ciclo da cultura. Também foi observada a ocorrência de baixas temperaturas no período reprodutivo (pré-floração e floração) da cultura, o que provocou esterilidade de espiguetas.

Com base no índice estabelecido entre o potencial de aquecimento global parcial anual e a produtividade de grãos (PAGp anual/PG), o sistema de preparo convencional apresentou o menor índice, mostrando-se mais efetivo em mitigar o PAGp anual, apresentando um valor de $0,72 \text{ kg de CO}_2 \text{ equiv. kg}^{-1}$ de arroz produzido (Fig. 12), enquanto que para o sistema de preparo com rolo-faca e sistema de preparo antecipado esse índice foi de 1,06 e 1,49 $\text{kg de CO}_2 \text{ equiv. kg}^{-1}$ de arroz produzido. Isso significa que para cada kg de arroz produzido, o sistema de preparo convencional deixa de emitir $0,77 \text{ kg de CO}_2 \text{ equiv.}$, quando comparado ao sistema de preparo antecipado.

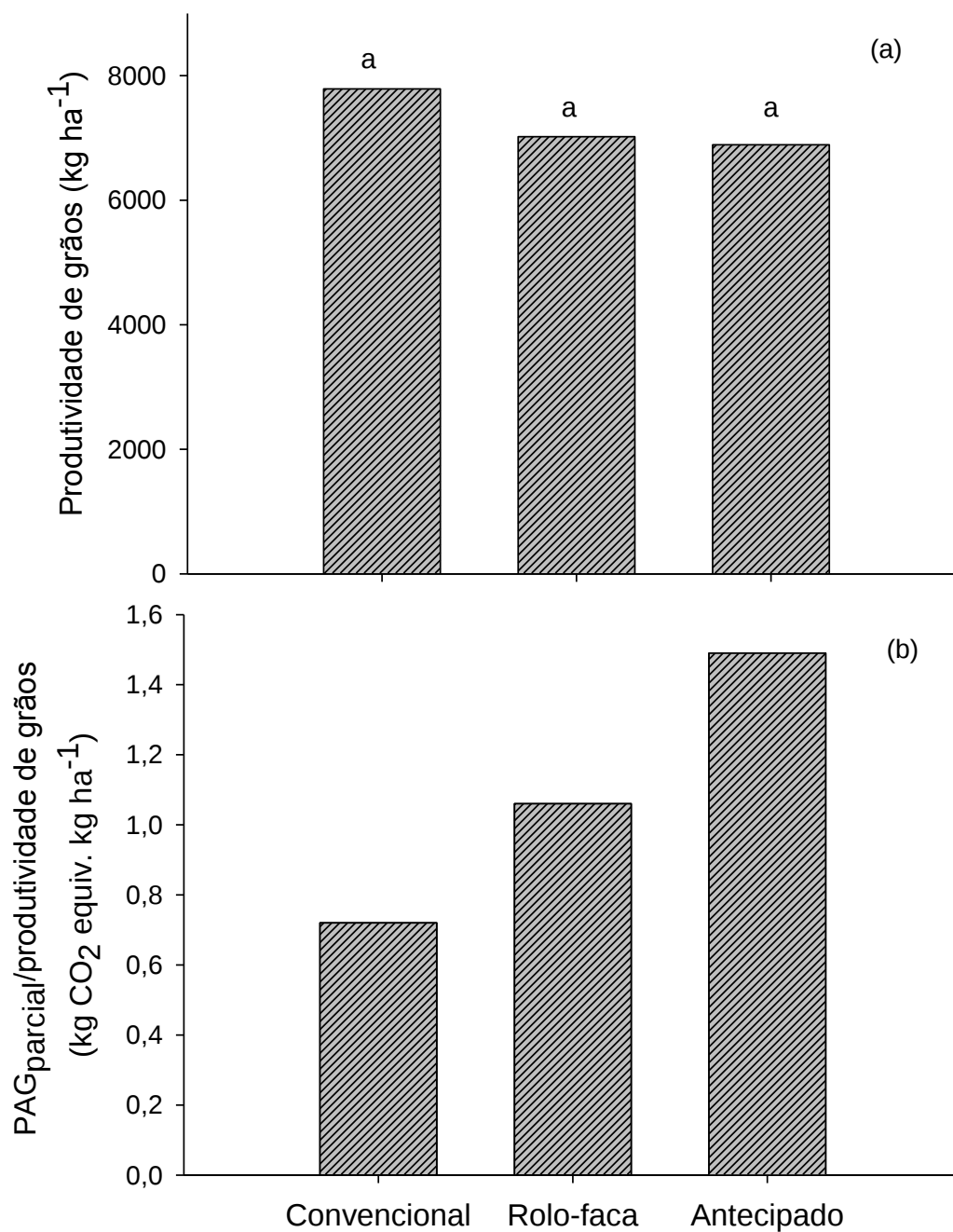


Figura 12. Produtividade de grãos de arroz (a), irrigado por alagamento, e índice PAGp anual/PG (b), sob diferentes sistemas de preparo do solo. Médias seguidas de letras distintas sobre as barras diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

7 CONCLUSÕES

Dentre os sistemas de manejo que promovem a incorporação da palha no outono/inverno (entressafra), o sistema com uso de rolo-faca apresenta potencial de mitigar as emissões de CH_4 ao longo do ano (períodos de entressafra e safra), embora favoreça a emissão de N_2O .

Independentemente da época e do manejo do solo e da palha, o período de cultivo do arroz (safra) contribui com mais de 80% para o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) anual em Planossolo cultivado com arroz irrigado, em razão das maiores emissões de CH_4 . Em decorrência, os sistemas de manejo do solo e da palha que reduzem as emissões de CH_4 apresentam maior potencial de mitigação do PAGp.

Os sistemas de manejo com incorporação da resteva do arroz em pós-colheita (outono), sistemas de preparo antecipado e rolo-faca, apresentam maior Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) anual, relativamente ao sistema convencional, em que o solo é mantido em pousio durante o outono/inverno, sendo preparado, apenas, imediatamente antes do cultivo subsequente de arroz (primavera).

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, S.; LI, C.; DAI, G.; ZHAN, M.; WANG, J.; PAN, S.; CAO, C. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China. **Soil and Tillage Research**, v.106, n.1, p.54-61, 2009.

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, n.1-3, p.367-375, 2000.

AULAKH, M.S.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H. Methane emissions from rice field – quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. **Advances in Agronomy**, v.70, n.1, p.193-260, 2001.

AZAMBUJA, I.H.V. et al. Aspectos socioeconômicos da produção do arroz. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 23-41.

BAYER, C.; GOMES, J.; VIEIRA, F.C.B.; ZANATTA, J.A.; PICCOLO, M.C.; DIECKOW, J. Methane emission from soil under long-term no-till cropping system. **Soil and Tillage Research**, v.124, p.1-7, 2012.

BUSS, Gerson Lübke. **Emissões de Metano e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado por Aspersão, Alagamento Contínuo e Intermitente**. 2012. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K.; MINAMI, K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. **Plant and Soil**, v.196, n.1, p.7-14, 1997.

CAMARGO, F. A. O. SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.29, n.1, p.171-180, 1999.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R. D.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.277-289, 2010.

CERRI, C.C. E CERRI, C.E.P. **Seqüestro de carbono em solos na América Latina**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.40-44. 2007.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira 2012/2013**: grãos, oitavo levantamento, maio 2013. Brasília: Conab, 2013.

CONRAD, R.; Bak, F.; Seitz, H.J.; Thebrath, B.; Mayer, H.P.; Schutz, H. Hydrogen turnover by psychrophilic homoacetogenic and mesophilic methanogenic bacteria in anoxic paddy soil and lake sediment. **FEMS Microbiology Ecology**, v.62, p.285-294, 1989.

CONRAD, R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO). **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, n.1-2, p. 59-69, 2002.

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

COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, p.545-559. 2008a.

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, 2008b.

COUNCE, PAUL A.; KEISLING, TERRY C.; MITCHELL, ANDREW J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v.40, n.2, p.436-443, 2000.

DALAL, R.; ALLEN, D.; LIVESLEY, S.; RICHARDS, G. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. **Plant and Soil**, v.309, n.1-2, p. 43–76, 2008.

DUARTE, Francisco Mendoza. **Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e eficiência da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado**. 2006. 85f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: emissões de óxido nitroso provenientes de solo agrícola**. Relatório de Referência. Ministério da Ciência e Tecnologia: Brasília, 2006.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Emissão de Metano em Sistemas de Produção de Arroz Irrigado: quantificação e Análise**. Ministério da Ciência e Tecnologia: Brasília, 2008. 84p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: emissões de metano do cultivo de arroz. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, 2010. 50p.

ESCOBAR, Luisa Fernanda. **Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo do planalto médio do rio grande do sul**. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em ciência do solo) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D.W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D.C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; van DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: SOLOMON, D.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER H. L. **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: Cambridge University Press. 2007. p. 129-234.

GARCIA, J. L. Taxonomy and ecology of methanogens. **FEMS Microbiology Letters**, v.87, n. 3-4, p.297-308, 1990.

GOMES, Juliana. **Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo**. 2006. 126f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A.; VERNETTI Jr., F. J.; SOUSA, R. O. Plantio direto e cultivo mínimo em arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Cap.12, p.349-386.

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

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, n.6, p.2180-2186, 2000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Comentarios/lspa_201312comentarios.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Comentarios/lspa_201312comentarios.pdf)>. Acesso em: 15 jan, 2014.

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

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

LAL, R.; KIMBLE, J.; STEWART, B.A. World soils as a source or sink for radiatively-active gases. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil management and greenhouse effect**. Advances in Soil Science. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1995. p. 1-7.

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal of Soil Biology**, v.37, n.1, p.25-50, 2001.

LIMA, M.A.; PESOA, M.C.P.Y.; VILELLA, O.V. Emissão de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p.93-140.

LIU, S.; QIN, Y.; ZOU, J.; LIU, Q. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. **Science of the Total Environment**, v.408, p. 906-913, 2010.

MA, J.; MA, E.; XU, H.; YAGI, K.; CAI, Z. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields. **Soil Biology and Biochemistry**, v.41, n.5, p.1022-1028, 2009.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Disponível em: <<http://gvces.com.br/arquivos/177/EstimativasClima.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

MINAMI, K. The effect of nitrogen fertilizer use and other practices on methane emission from flooded rice. **Fertilizer Research**, v.40, n.1, p.71-84, 1995.

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

MOSIER, A. R.; DUXBURY, J. M.; FRENEY, J. R.; HEINEMEYER, O.; MINAMI, K., JOHNSON, D. E. Mitigating agricultural emissions of methane. **Climatic Change**, v.40, n.1, p.39-80, 1998.

MOTERLE, Diovane Freire. **Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado**. 2011. 148f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

NASER, H. M.; NAGATA, O.; TAMURA, S.; HATANO, R. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.53, n.1, p.95-101, 2007.

NEUE, H. U. Fluxes of methane from rice fields and potential for mitigation. **Soil Use and Management**, v.13, n.s4, p.258-267, 1997.

NOUCHI, I; MARIKO, S.; AOKI, K. Mechanisms of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. **Plant Physiology**, v.94 , n.1, p. 59-66, 1990.

PINTO, M., MERINO, P., PRADO, A., ESTAVILLO, J.M., YAMULKI, S., GEBAUER, G., PIERTZAK, S., LAUF, J., OENEMA, O. Increased emissions of nitric oxide and nitrous oxide following tillage of a perennial pasture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.70, n.1, p.13–22, 2004.

PIVA, Jonatas Thiago. **Emissão de óxido nitroso e metano em um latossolo bruno submetido a sistemas de preparo e integração lavoura-pecuária**. 2010. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PONNANPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.

REDDY, K.R., DELAUNE, R.D. Wetlands and Global Climate Change. In: *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2008. p.599-623.

RUSCHEL, A.P. O efeito estufa e a cultura arrozeira. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.45, n.401, p.3-4, 1992.

SCHUTZ, H.; SEILER, W.; CONRAD, R. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. **Biogeochemistry**, v.7, n.1, p.33-53, 1989.

SHAN, Y.; CAI, Z.; HAN, Y.; JOHNSON, S. E.; BURESH, R. J. Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and rice straws with different C: N ratios. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.54, n.1, p.46-56, 2008.

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

SILVA, L. S.; GRIEBELER, G.; MOTERLE, D. F.; BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; POCOJESKI, E. Dinâmica da emissão de metano em solos sob cultivo de arroz irrigado no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.2, p.473-483, 2011.

SMITH, K.A., BALL, T., CONEN, F., DOBBIE, K.E., MASSHEDER, J., REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v.54, n.4, p.779–79, 2003.

DO ARROZ, REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA. IRRIGADO, 28. 2010, Bento Gonçalves. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Porto Alegre: SOSBAI, 2010.**

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil.** Itajaí: SOSBAI, 2012. 179 p.

SOUSA, R.O.; BOHNEN, H.; MEURER, E.J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.26, p.343-348, 2002.

SOUSA, R.O.; CAMARGO, F.A.O; VAHL, L.C. Solos Alagados (Reações de Redox). In: MEURER, E.J. **Fundamentos de Química do Solo.** 4-Ed. Porto Alegre, 2010.

SOUSA, R.O.; VAHL, L.C.; OTERO, X.L. Química de Solos Alagados. In: MELLO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e Mineralogia do Solo.** Parte II – Aplicações. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2008. p.485-528.

SOUZA, Eduardo Lorensi. **Emissão de óxido nitroso e metano em área de cultivo com arroz irrigado com diferentes manejos da palha pós-colheita.** 2013. 139f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

STANSEL, J. W. The rice plant: its development and yield. In: SIX decades of rice research in Texas. Beaumont: Texas Agricultural Experiment Station, 1975. p. 9-21.

STEINMETZ, S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. M.; FAGUNDES, P. R. R.; SCIVITTARO, W. B.; ALMEIDA, I. R.; REISSER JÚNIOR, C.; DEIBLER, A. N.; MATZENAUER, R.; RADIN, B.; PRESTES, S. D.; SILVA, M. F. Uso de graus-dia para estimar a data de diferenciação da panícula (DP) de seis subgrupos de cultivares de arroz irrigado visando à adubação nitrogenada em cobertura no Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. 75 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 121).

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, P.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul.** 2.ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de Solo, plantas e outros materiais.** Porto Alegre: Departamento de Solos - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

WANG, Z.; LINDAU, C.W.; DELAUNE, R.D.; PATRICK JR., W.H. Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizers. **Fertilizer Research**, v.33, n.2, p.115-121, 1992.

WANG, Z.; DELAUNE, R.D. & PATRICK JR., W.H.; MASSCHELEYN, P.H. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice. **Soil Science Society of America Journal**, Vol.57, n.2, p.382-385, 1993.

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, Z., INESON, P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n.3, p.427–433, 2003.

WATANABE, .; TAKEDA, T.; KIMURA, M. Evaluation of origins of CH₄ carbon emitted from rice paddies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.104, n.D19, p. 23623-23629, 1999.

WASSMANN, R., NEUE, H. U., ALBERTO, M. C. R., LANTIN, R. S., BUENO, C., LLENARESAS, D.; ARAH, J.R.M.; PAPEN, H.; SEILER, W.; RENNENBERG, H. Fluxes and pools of methane in wetland rice soils with varying organic inputs. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.42, n.1-2, p.163-173, 1996.

WASSMANN, R.; LANTIN, R.S; NEUE, H.U; BUENDIA, L.V.; CORTON, T.M. & LU, Y. Characterizaion of methane emissions from rice fields in Asia. III Mitigation options and future research needs. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.58, n.1-3, p.23-36, 2000.

WASSMANN, R.; AULAKH, M.S.; LANTIN, R.S.; RENNENBERG, H. & ADUNA, J.B. Methane emission patterns from rice fields planted to severed rice cultivars for nine seasons. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.64, p.111-124, 2002.

WESZ, Jonas. **Mitigação das emissões de metano e óxido nitroso em Planossolo pela adequação do manejo da água em cultivo de arroz irrigado**. 2012. 62p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

YAO, Z., ZHOU, Z., ZHENG, X., XIE, B., MEI, B., WANG, R., BUTTERBACHBAHL,K., ZHU, J., 2010. Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystems in China. **Plant and Soil**, v.327, n.1-2, p.315-330, 2010.

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

YU, KEWEI; PATRICK, WILLIAM H. Redox window with minimum global warming potential contribution from rice soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, n.6, p.2086-2091, 2004.

ZANATTA, Josiléia Acordi. **Emissões de óxido nitroso afetada por sistemas de manejo do solo e fontes de nitrogênio**. 2009. 79f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ZHENG, X.H., WANG, M.X., WANG, Y.S., SHEN, R.X., GOU, J., LI, J., JIN, J.S., LI, L.T. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from crop lands: a case study

on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China. **Chemosphere - Global Change Science**, v.2, n.2, p.207–224, 2000.

ZOU, J., HUANG, Y., JIANG, J., ZHENG, X., SASS, R.L. A 3-year field measurement of CH₄ and N₂O emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue and fertilizer application. **Global biogeochemical cycles**, v.19, n.2, 2005.

ZSCHORNACK, Tiago. **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. 101f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.