

Impacto de plantas de cobertura e da drenagem do solo nas emissões de CH₄ e N₂O sob cultivo de arroz irrigado

Tiago Zschornack⁽¹⁾, Carla Machado da Rosa⁽¹⁾, Estefânia Silva Camargo⁽¹⁾,
Cecília Estima Sacramento dos Reis⁽¹⁾, Rodrigo Schoenfeld⁽²⁾ e Cimélio Bayer⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos, Avenida Bento Gonçalves, nº 7.712, CEP 91540-000 Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: tiago.zsc@gmail.com, carlamrosa@yahoo.com.br, estefaniascamargo@gmail.com, ceciliasacramento@gmail.com, cimelio.bayer@ufrgs.br ⁽²⁾Instituto Rio Grandense do Arroz, Estação Experimental do Arroz, Avenida Bonifácio Carvalho Bernardes, nº 1.494, CEP 94930-030 Cachoeirinha, RS, Brasil. E-mail: rodrigo-schoenfeld@irga.rs.gov.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto das plantas de cobertura de inverno azevém (*Lolium multiflorum*) e azevém+cornichão (*Lotus corniculatus*), bem como da drenagem parcial do solo, nas emissões de CH₄ e N₂O em um Planossolo cultivado com arroz irrigado. Amostras de ar foram coletadas semanalmente com câmara estática fechada, parcialmente inserida no solo (0,05 m). Calcularam-se o potencial de aquecimento global parcial (PAGp=CH₄×25+N₂O×298) e o PAGp por unidade de produtividade de grãos (PAGpPG). A drenagem parcial foi estabelecida pela suspensão temporária da irrigação por períodos de 8 a 15 dias, durante três ocasiões ao longo do ciclo da cultura. O aporte de resíduos pelas plantas de cobertura intensificou os fluxos de CH₄ do solo, que excederam em dez vezes a emissão acumulada do solo em pousio invernal. As emissões de N₂O foram maiores com o consórcio azevém+cornichão, em comparação ao azevém e ao pousio. O cultivo de plantas de cobertura elevou o índice PAGpPG (0,35 kg de CO₂eq por quilograma de arroz), comparativamente ao pousio (0,06 kg kg⁻¹). Nos tratamentos com cobertura de inverno, as estratégias de mitigação devem focar principalmente no CH₄, que foi responsável pela maior porção (80%) do PAGp. A drenagem parcial reduziu em até 50% o PAGp e apresenta grande potencial para mitigar as emissões de gases em sistemas de produção de arroz irrigado.

Termos para indexação: *Oryza sativa*, gases de efeito estufa, irrigação intermitente, manejo da água, potencial de aquecimento global, resíduos culturais.

Impact of cover crops and soil drainage in CH₄ and N₂O emissions under irrigated rice cultivation

Abstract – The objective of this work was to evaluate the effect of the winter cover crops ryegrass (*Lolium multiflorum*) and ryegrass+birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*), as well as of partial soil drainage, on CH₄ and N₂O emissions in an Alfisol cultivated with paddy rice. Air samples were collected weekly using static closed chambers partially inserted in the soil (0.05 m). Partial global warming potential (pGWP= CH₄×25+N₂O×298) and yield-scaled pGWP were calculated. Partial soil drainage was established with temporal suspensions of the irrigations for periods of 8 to 15 days, during three occasions throughout the crop cycle. Biomass input by cover crop residues increased CH₄ fluxes, which exceeded ten times the accumulated emissions of fallow soil. N₂O emissions were higher in the ryegrass+birdsfoot trefoil treatment, compared with ryegrass and fallow. Cover crops increased yield-scaled pGWP (0.35 kg CO₂eq per kilogram of rice) compared with fallow (0.06 kg kg⁻¹). In the treatments with winter crops, mitigation strategies should focus mainly on CH₄, which was responsible for the greater portion (80%) of pGWP. Partial drainage reduced pGWP up to 50% and has great potential for mitigating gas emissions in subtropical irrigated rice production systems.

Index terms: *Oryza sativa*, greenhouse gases, intermittent irrigation, water management, global warming potential, crop residues.

Introdução

O cultivo do arroz irrigado por inundação tem grande relevância econômica no Sul do Brasil, especialmente no Rio Grande do Sul, onde a área

anual cultivada com o cereal supera um milhão de hectares, e a produção representa aproximadamente 65% do total produzido no País (Acompanhamento..., 2015). A produção de arroz sob prolongadas condições de alagamento do solo favorece a produção de metano

(CH₄), que é um importante gás de efeito estufa (GEE), produzido por microrganismos metanogênicos via decomposição anaeróbia do material orgânico presente no solo (Reddy & DeLaune, 2008). A capacidade de absorção da radiação infravermelha por esse gás supera em 25 vezes a do dióxido de carbono (CO₂), num período de 100 anos (Solomon et al., 2007). Apesar de emitido em menores quantidades, o óxido nitroso (N₂O) também tem capacidade de absorver a radiação infravermelha, e seu potencial de promoção do aquecimento atmosférico chega a ser 12 vezes maior do que o do CH₄ (Solomon et al., 2007). No entanto, solos cultivados com arroz em condições de permanente alagamento usualmente contribuem pouco para as emissões de N₂O, comparados a solos bem drenados (Linguist et al., 2012), uma vez que, sob condições anaeróbias, parte do N₂O produzido é reduzido a N₂ (Reddy & DeLaune, 2008).

O aporte de resíduos vegetais previamente ao cultivo do arroz irrigado altera as condições de oxirredução do solo e pode ter efeitos distintos sobre as emissões de CH₄ e N₂O pelo solo (Kim et al., 2013). A adição de material orgânico, além de favorecer processos de redução no solo, também intensifica as emissões de CH₄ pela disponibilização de C lábil para microrganismos metanogênicos (Kim et al., 2012). Por sua vez, a supressão da água de irrigação, com consequente drenagem e oxidação do solo, pode mitigar significativamente as emissões de CH₄ (Tyagi et al., 2010). Contudo, ao se suprimir a irrigação e promover a difusão do oxigênio no solo, cria-se um ambiente favorável à produção de N₂O, pela intensificação dos processos de nitrificação e desnitrificação (Zou et al., 2007). As emissões de N₂O do solo decorrem de transformações do N mediadas por microrganismos e dependem do tipo de material orgânico depositado (Zschornack et al., 2011).

Tanto a adição de resíduos ao solo como o manejo da água com irrigação intermitente são práticas preconizadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Edenhofer et al., 2014) para mitigar as emissões de GEE em áreas cultivadas com arroz irrigado. Todavia, o efeito de tais práticas nessas emissões ainda é pouco conhecido nas condições subtropicais brasileiras. Além disso, esses estudos geralmente não contemplam emissões de N₂O do solo (Moterle et al., 2013), tampouco os possíveis impactos da adição de resíduos por plantas de cobertura e da irrigação intermitente sobre a produtividade de grãos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do aporte de resíduos por plantas de cobertura de inverno (azevém e azevém+cornichão) nas emissões de CH₄ e N₂O, em Planossolo sob cultivo de arroz irrigado, em comparação ao sistema tradicional de pousio invernal. Adicionalmente, o efeito da supressão da água de irrigação, com consequente drenagem do solo, também foi avaliado, em comparação à área mantida sob irrigação contínua durante todo o ciclo da cultura.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido durante o ano agrícola 2007/2008, na Estação Experimental do Arroz, do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), em Cachoeirinha, RS. O clima da região é do tipo subtropical úmido (Cfa), conforme classificação de Köppen, com temperatura média anual de 20 °C e precipitação média anual de 1.394 mm. A área escolhida para condução do experimento encontrava-se sob pousio por 4 anos, e seu solo foi classificado como Planossolo Háptico Eutrófico arênico (Santos et al., 2006), com 210 g kg⁻¹ de argila; pH_{H2O}, 4,4; 31,0 g kg⁻¹ de matéria orgânica; 18 e 38 mg dm⁻³ de fósforo e potássio (Mehlich 1), respectivamente; 11,0 cmol_c dm⁻³ de CTC_{pH 7,0}, na camada de 0–0,20 m. O solo foi corrigido previamente à instalação do experimento (início de abril), com a aplicação e incorporação de 4,2 Mg ha⁻¹ de calcário (PRNT 100%).

Foram avaliadas as culturas de inverno de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) e do consórcio azevém+cornichão (*Lotus corniculatus* L.), além do pousio, com plantas espontâneas, usado como tratamento testemunha. As plantas predominantes nas parcelas em pousio pertenciam à família Poaceae (*Lolium multiflorum*, *Echinochloa* spp. e *Digitaria* spp.). As culturas de inverno foram semeadas a lanço no final de abril de 2007, tendo-se utilizado 30,0 kg ha⁻¹ de sementes de azevém e 6,0 kg ha⁻¹ de cornichão. Por ocasião da semeadura, aplicaram-se 200 kg ha⁻¹ da fórmula 05-20-30 (N-P₂O₅-K₂O) como adubação de base. As parcelas cultivadas apenas com azevém ainda foram adubadas com ureia (46 kg ha⁻¹ de N), ao final de julho. A produção de matéria seca (MS) foi avaliada em setembro, previamente à dessecação da área experimental, em que os tratamentos com pousio, azevém e consórcio atingiram, respectivamente, 1,5, 4,5 e 4,6 Mg ha⁻¹ de MS. Utilizou-se o delineamento

de blocos ao acaso, com três repetições, com os tratamentos dispostos em parcelas de 7,0x23,5 m, no campo.

O arroz, cultivar Irga 424, foi mecanicamente semeado, no início de novembro, sobre a resteva dessecada, com 100 kg ha⁻¹ de sementes e espaçamento entrelinhas de 0,17 m. A adubação de base foi realizada com 10 kg ha⁻¹ de N, 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 70 kg ha⁻¹ de K₂O, enquanto, em cobertura, foram aplicados 110 kg ha⁻¹ de N (ureia), com 66% aplicado no início da irrigação (estádio V₃-V₄), e o restante no estágio V₈, segundo escala de Counce et al. (2000). As parcelas foram inundadas ao final de novembro, tendo-se mantido uma lâmina d'água de aproximadamente 5,0 cm de altura. Em razão da ocorrência de sintomas de toxidez de ferro nas plantas de arroz, a irrigação foi suspensa por períodos de 8 e 15 dias, em 21 de dezembro e 24 de janeiro, respectivamente. Após a suspensão em 23 de fevereiro, a área foi mantida drenada até a colheita. As demais práticas de manejo seguiram as recomendações técnicas para a cultura (Congresso..., 2007).

Para verificar o efeito da drenagem do solo nas emissões de GEE, uma área adjacente cultivada com arroz em cultivo mínimo, sobre palhada de azevém, permanentemente alagada, foi monitorada durante o mesmo período. Nessa área, o solo foi superficialmente preparado (grade) em março de 2007, e o azevém foi estabelecido por ressemeadura natural. O arroz, da cultivar Irga 422 CL, foi semeado em outubro, com 100 kg ha⁻¹ de sementes e espaçamento de 17 cm nas entrelinhas. As demais práticas agrícolas e insumos aplicados na área foram similares ao experimento com as coberturas de inverno, com maiores detalhes em Bayer et al. (2015). A produtividade de grãos foi avaliada em área útil de 6,8 m², tendo-se corrigido a umidade para 13%.

As coletas de ar foram iniciadas após o alagamento do solo, em V₃-V₄, e realizadas semanalmente com uso de câmara estática fechada (Minamikawa et al., 2012). A câmara constituía-se de uma base de alumínio (0,60x0,60 m) parcialmente inserida no solo (0,05 m), perfurada lateralmente para circulação da água, e de uma tampa que se sobrepunha à base, em cada evento de coleta. Extensores de alumínio foram utilizados, quando necessário, para aumentar a altura da câmara e não danificar as plantas de arroz (Bayer et al., 2014). Foi instalada uma base em cada parcela, antes do

alagamento, posicionada de forma a abranger três linhas de plantio. As amostras de ar foram coletadas no turno da manhã, entre as 9 h e 11 h, com auxílio de seringas de polipropileno (20 mL), aos 0, 5, 10, 15 e 20 minutos após o fechamento da câmara. O ar do interior da câmara foi homogeneizado por 30 segundos, antes de cada amostragem, com uso de ventiladores dispostos na parte superior da câmara. A temperatura interna foi monitorada por meio de termômetro digital de haste com display externo. Água foi adicionada em canaletas localizadas na parte superior das bases e extensores, para vedação do sistema.

As amostras de ar foram analisadas num intervalo máximo de 24 horas após cada coleta, tendo-se determinado as concentrações de CH₄ e de N₂O em cromatógrafo Shimadzu 2014, modelo "Greenhouse". Os fluxos dos gases foram calculados de acordo com expressão: $f = \Delta Q/\Delta t \times PV/RT \times M/A$; em que f é o fluxo de N₂O ou CH₄ (g ha⁻¹ por dia); $\Delta Q/\Delta t$ é a variação na concentração do gás (mol h⁻¹) na câmara, no momento da coleta; P é a pressão atmosférica (atm) no interior da câmara, que foi assumida como 1 atm; V é o volume da câmara (L); R é a constante dos gases ideais (0,08205 atm L mol⁻¹ K⁻¹); T é a temperatura dentro da câmara no momento da coleta (K); M é a massa molar do gás ($\mu\text{g mol}^{-1}$); A é a área da base da câmara (m²). A emissão acumulada de CH₄ e de N₂O foi calculada a partir da integral da área sob a curva estabelecida pela interpolação dos valores diários de emissão (Bayer et al., 2014). Com base na emissão acumulada de CH₄ e de N₂O, e levando-se em conta o potencial de aquecimento global de cada gás em relação ao CO₂ – 25 vezes para o CH₄ e 298 vezes para o N₂O, num horizonte de 100 anos (Solomon et al., 2007) –, foram calculadas as emissões em quantidades de CO₂ equivalente (CO₂eq). A soma desses equivalentes foi denominada de Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp). A partir do PAGp, calculou-se a relação entre a quantidade de GEE emitida na safra (CO₂eq) e produtividade de grãos (PG), conforme expressão: $\text{PAG}_p/\text{PG} = \text{PAG}_p/\text{RG}$; em que PAGp é a quantidade de CH₄ + N₂O emitidos na safra (em CO₂eq) e PG é a produtividade de grãos de arroz em kg ha⁻¹.

Os sistemas com e sem uso de plantas de cobertura inverniais foram submetidos à análise da variância, e a diferença entre as médias dos tratamentos foi avaliada com o teste de Tukey, a 10% de probabilidade. As plantas de cobertura de solo, a data de amostragem

e a respectiva interação entre esses fatores foram considerados como efeitos fixos, enquanto os blocos, como efeito aleatório. A área adjacente, conduzida com lâmina contínua de irrigação, não foi incluída na análise estatística e foi apenas tomada como referência para avaliar o efeito da drenagem no experimento de coberturas de solo. As análises foram feitas com o pacote estatístico SAS v. 9,4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA).

Resultados e Discussão

As plantas de cobertura intensificaram os fluxos de CH₄ no solo de forma variável, ao longo do ciclo da cultura do arroz (Tabela 1). O uso de plantas de cobertura de inverno resultou em um fluxo médio de CH₄ de 1.005 g ha⁻¹ por dia, enquanto, quando o arroz foi cultivado após o pousio, o fluxo médio foi de 99 g ha⁻¹ por dia (Figura 1). O aporte de resíduos vegetais em solos cultivados com arroz irrigado aumenta a produção e a emissão de CH₄ (Kim et al., 2012) pois, além de estimular a atividade de microrganismos metanogênicos, pela adição de C lábil, esta favorece a diminuição do potencial redox do solo ao acelerar a redução de íons inorgânicos oxidados (NO₃⁻, Mn⁴⁺, Fe³⁺ e SO₄²⁻) (Dalal et al., 2008).

Tabela 1. Resumo da análise de variância para as diferentes variáveis.

Fator de variação	GL	Valor F
Fluxo de CH ₄		
Tratamento	2	62,26*
Data de amostragem	13	38,63**
Tratamento x amostragem	26	7,94**
Fluxo de N ₂ O		
Tratamento	2	2,73 ^{ns}
Data de amostragem	13	11,12**
Tratamento x amostragem	26	1,73†
Emissão acumulada CH ₄		
Tratamento	2	128,56**
Emissão acumulada N ₂ O		
Tratamento	2	14,01†
PAGp		
Tratamento	2	413,21**
Produtividade de grãos		
Tratamento	2	0,43 ^{ns}
PAGpPG		
Tratamento	2	464,71**

^{ns}Não significativo. †,*e**Significativo 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. PAGp, potencial de aquecimento global parcial; e PAGpPG, PAGp por unidade de produtividade de grãos (PG).

O aumento nos fluxos de CH₄, nesses tratamentos, teve início na terceira semana após o alagamento do solo, o que coincidiu com os primeiros sintomas de toxidez de ferro nas plantas de arroz. O processo de metanogênese depende da dinâmica de oxirredução no solo, em especial dos óxidos e hidróxidos de ferro, e é desencadeado quando praticamente todo o Fe³⁺ encontra-se reduzido a Fe²⁺ (Zschornack et al., 2011).

Similarmente ao CH₄, os fluxos de N₂O variaram no decorrer do ciclo do arroz, nos tratamentos com plantas de cobertura (Tabela 1). Entretanto, as principais variações desse gás ocorreram nas primeiras semanas após o alagamento (Figura 1). O fluxo positivo na primeira coleta (35 g ha⁻¹ por dia), no tratamento com consórcio, possivelmente deveu-se à rápida decomposição e mineralização do N, presente em maior quantidade na biomassa do cornichão, que pertence à família Fabaceae. Por outro lado, o aporte exclusivo de azevém resultou nos menores fluxos de N₂O, provavelmente pela reduzida disponibilidade de N no solo em virtude da imobilização microbiana decorrente da elevada relação C/N dos resíduos dessa planta. Além disso, resíduos com elevada relação C/N intensificam as condições anaeróbias do solo com a redução do N₂O a N₂ (Kim et al., 2013).

As drenagens realizadas na área experimental para atenuar a toxidez de ferro afetaram sensivelmente a dinâmica das emissões de CH₄ e de N₂O (Figura 1). Comparativamente à área sob alagamento contínuo, os maiores fluxos de N₂O ocorreram durante os períodos de solo não alagado, sobretudo na primeira e na última drenagem, quando os fluxos máximos atingiram 98,8 g ha⁻¹ por dia, no consórcio, e 80,8 g ha⁻¹ por dia, no azevém. Fluxos negativos de N₂O, verificados na maioria dos eventos de coleta (8 em 13) na área sob alagamento contínuo, evidenciaram a existência de absorção desse gás pelo sistema solo-água. Em condições anóxicas e de limitado teor de nitrato no solo, parte da microbiota pode utilizar o nitrito e o N₂O como aceptores de elétrons, o que resulta na produção e emissão de N₂ em vez de N₂O (Reddy & DeLaune, 2008).

Diferentemente do N₂O, os fluxos de CH₄ diminuíram sensivelmente nos períodos de solo drenado (Figura 1). À exceção da segunda drenagem, quando as emissões se mantiveram estáveis nos tratamentos com adição de resíduos, os fluxos de CH₄, nos demais períodos de drenagem, foram reduzidos a valores inferiores a 800 g ha⁻¹ por dia. Os fluxos de CH₄ no solo não drenado

variaram de 220 a 4.691 g ha⁻¹ por dia, com as maiores taxas (> 2.500 g ha⁻¹ por dia) tendo ocorrido entre a 5^a e a 12^a semana após o alagamento.

As emissões acumuladas de CH₄ foram significativamente afetadas pela inserção de plantas de cobertura no sistema de cultivo, em comparação ao solo mantido sob pousio (Tabela 1). Contudo, os cultivos de cobertura não diferiram entre si quanto a essa variável (Figura 2). As emissões dos tratamentos com azevém

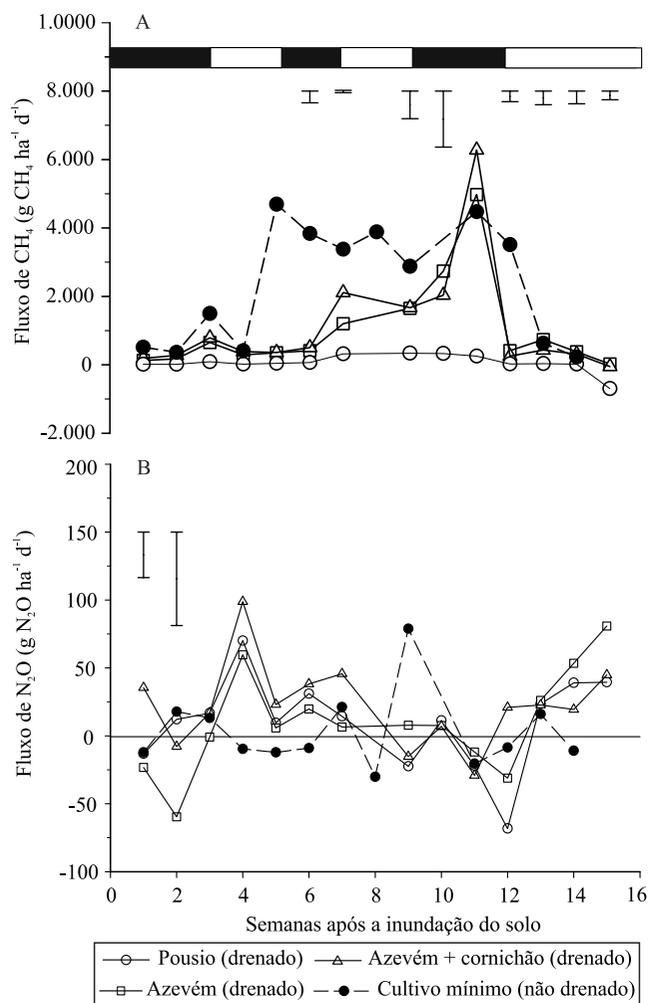


Figura 1. Fluxos de CH₄ (A) e de N₂O (B) em solo cultivado com arroz irrigado, sob diferentes cultivos de cobertura, em solo drenado (submetido à suspensão parcial da irrigação), e em solo cultivado com lâmina contínua de água. Barras verticais representam a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey, a 10% de probabilidade. A barra horizontal superior indica o manejo da água usado no experimento com plantas de cobertura: barra cinza, presença de lâmina de água; e barra sem preenchimento, ausência de lâmina de água.

e azevém+cornichão atingiram, respectivamente, 119,1 e 118,3 kg ha⁻¹ de CH₄, aproximadamente 90% superiores do que as observadas no solo mantido em pousio. As emissões de CH₄ estão diretamente relacionadas com a quantidade (Dalal et al., 2008) e a qualidade do resíduo aplicado (Kim et al., 2012, 2013). O aumento da relação C/N dos resíduos implica maior disponibilidade de C (total e lábil) no solo (Kim et al., 2012), servindo de substrato para as bactérias metanogênicas. No presente trabalho, a relação C/N dos resíduos não foi determinada, tampouco os fluxos de GEE antes da inundação do solo. Assim, a similaridade nas emissões de CH₄ entre os tratamentos com os cultivos de cobertura pode estar associada à decomposição prévia desses materiais no período entre a dessecação das coberturas e o alagamento do solo (dois meses). Zschornack et al. (2011), ao avaliar o efeito da adição de resíduos de azevém e de serradela (leguminosa) nas emissões de GEE, em solo cultivado com arroz inundado, não verificaram diferença estatística na quantidade de CH₄ emitida entre os dois tipos de resíduos, e atribuíram o resultado à decomposição prévia de ambos os resíduos durante o período que antecedeu o alagamento do solo (25 dias).

As emissões acumuladas de N₂O também foram afetadas pelas diferentes coberturas do solo (Tabela 1), tendo sido superiores no tratamento com azevém+cornichão (Figura 2). O consórcio resultou na emissão de 2,31 kg ha⁻¹ de N₂O, aproximadamente o dobro da verificada nos sistemas com pousio e com azevém solteiro. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Toma & Hatano (2007), que observaram incrementos nas emissões de N₂O quando resíduos de menor relação C/N (cebola e soja) foram incorporados ao solo. A produção e a emissão de N₂O no solo são diretamente influenciadas pela composição bioquímica dos resíduos vegetais, de forma que, quanto menor a relação C/N, mais rápidas são a mineralização e a disponibilização do N para os processos de nitrificação e desnitrificação no solo (Kim et al., 2013).

As emissões de N₂O em solos cultivados com arroz irrigado geralmente são baixas (<1,5 kg ha⁻¹ por safra), em comparação a solos bem drenados (Linguist et al., 2012). No presente estudo, os três eventos de drenagem aumentaram as emissões de N₂O em mais de 200%, em comparação à área com lâmina contínua de água (0,47 kg ha⁻¹) (Figura 2). A drenagem do solo durante o cultivo do arroz aumenta as emissões de N₂O por estimular os processos de nitrificação e desnitrificação

(Zou et al., 2007), enquanto o alagamento contínuo mantém condições anóxicas no solo, nas quais o N_2O é convertido a N_2 .

Em comparação à área com irrigação contínua, os baixos fluxos de CH_4 nos períodos de solo drenado reduziram as emissões acumuladas desse gás em 55% e 96%, nos tratamentos com cultivos de cobertura e com pousio, respectivamente. Essas reduções foram similares às obtidas em outras partes do mundo, como na China (Hou et al., 2012), na Índia (Tyagi et al., 2010) e no Japão (Minamikawa & Sakai, 2005), onde foram

relatadas taxas de redução das emissões de CH_4 entre 41% e 78%, por meio de manejos alternativos da água de irrigação (irrigação controlada ou intermitente). A produção de CH_4 no solo é mediada por microrganismos metanogênicos, os quais metabolizam o C de compostos orgânicos somente em condições anóxicas e de baixo Eh (<-150 mV) (Dalal et al., 2008). A drenagem do solo, além de alterar suas condições eletroquímicas, diminui a população de microrganismos metanogênicos e aumenta a de metanotróficos (Ma & Lu, 2011), os quais são responsáveis pela oxidação do CH_4 .

O cultivo de plantas de cobertura aumentou significativamente o PAGp (CH_4+N_2O), calculado em quantidades de CO_2 equivalente (Tabela 1), principalmente em razão de seu efeito na emissão de CH_4 pelo solo (Figura 3). O aporte de resíduos de azevém e de azevém+cornichão resultou em emissões de 3.277 e 3.645 $kg\ ha^{-1}$ de CO_2eq , dos quais 81% e 90% referiram-se, respectivamente, à contribuição do CH_4 . Em contrapartida, no solo em pousio, a participação relativa do N_2O no PAGp sobressai à do CH_4 , tendo alcançado 53% de um total de 599 $kg\ ha^{-1}$ de CO_2eq . Esse resultado deveu-se, sobretudo, à menor contribuição do CH_4 , em razão da baixa quantidade de resíduos vegetais. O PAGp do solo continuamente alagado foi superior ao do solo drenado, tendo atingido 6.691 $kg\ ha^{-1}$ CO_2eq , dos quais 98% eram relativos a emissões de CH_4 . Esses resultados corroboram os de Zschornack et al. (2011), Bayer et al. (2014) e Bayer et al. (2015), os quais verificaram ampla contribuição do CH_4 ($>90%$) para o PAGp, em sistemas tradicionais de cultivo de arroz no Rio Grande do Sul (solo continuamente alagado).

A produtividade de grãos não foi significativamente afetada pelas diferentes coberturas do solo, tendo-se observado variação de 9.764 a 10.292 $kg\ ha^{-1}$ (Tabela 1, Figura 3). O aporte de resíduos ao solo, via resteva de culturas comerciais ou de plantas de cobertura, é uma prática usual e recomendada em diversos locais da Ásia em razão da melhoria nos atributos edáficos e do aumento na produtividade do arroz (Kim et al., 2013). A ausência de efeito dos cultivos de cobertura no presente trabalho pode estar associada ao fato de ser o primeiro ano de condução do experimento, o que não teria permitido tempo hábil para alterações significativas nos atributos do solo. A diferença de 31% na produtividade da área sob alagamento contínuo e a média dos tratamentos da área experimental, que sofreu drenagens, deveu-se,

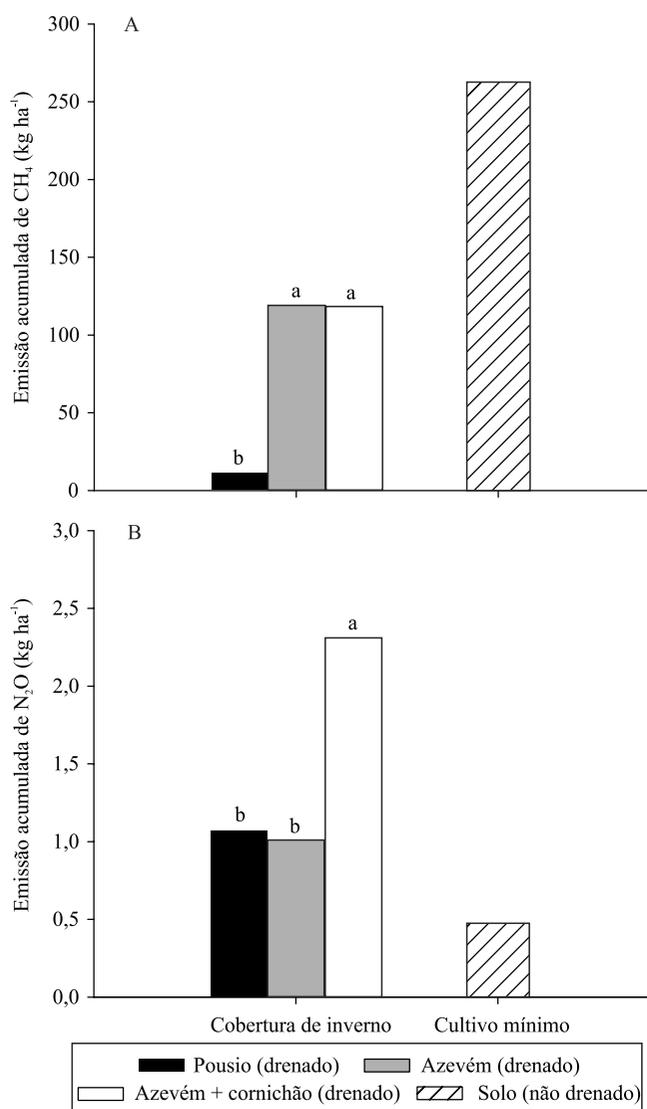


Figura 2. Emissão acumulada de CH_4 (A) e de N_2O (B) em solo drenado (submetido à suspensão parcial da irrigação), e em solo cultivado com lâmina contínua de água. Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste de Tukey, a 10% de probabilidade.

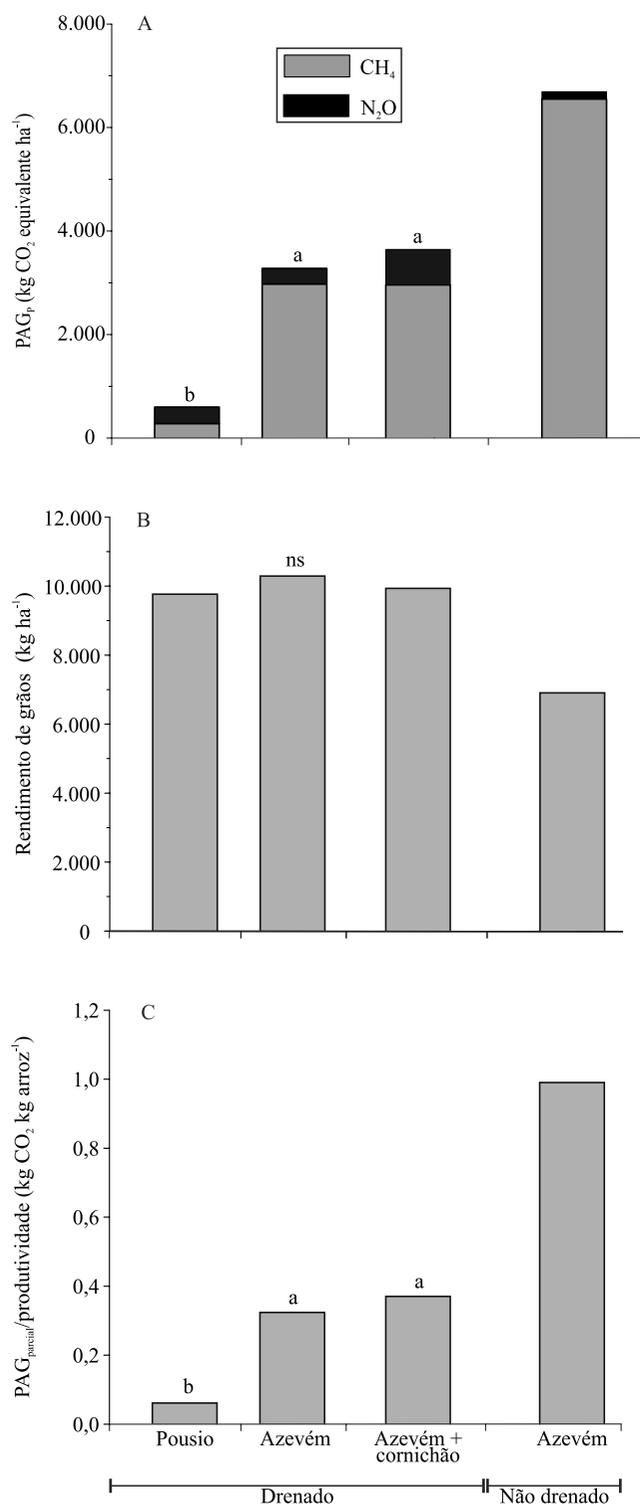


Figura 3. Potencial de aquecimento global parcial (PAG_p) (A), produtividade de grãos de arroz (PG) (B) e relação PAG_p/PG (C) em solo drenado (submetido à suspensão parcial da irrigação), e em solo cultivado com lâmina contínua de água. Médias seguidas de letras iguais, para solo drenado, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 10% de probabilidade.

entre outros fatores, às diferentes cultivares utilizadas, à menor toxidez de ferro na área com suspensão parcial da irrigação e à diferente infestação com arroz vermelho nas duas áreas.

O índice PAGpPG, que auxilia na identificação de práticas de manejo mais sustentáveis (Kim et al., 2013), foi significativamente influenciado pelas diferentes coberturas do solo (Tabela 1, Figura 3). Observou-se aumento médio de 566% no índice com adição de resíduos, em comparação ao pousio. Destaca-se a redução de aproximadamente quatro vezes na emissão de GEE na área experimental submetida à drenagem, em comparação à área com lâmina de água contínua. Esses resultados, no entanto, devem ser considerados com precaução, em razão de a área adjacente ter sido utilizada como mera testemunha e das diferenças nas condições experimentais entre as duas áreas. Portanto, estudos específicos do manejo da água de irrigação devem ser conduzidos para avaliar precisamente o papel da drenagem nas emissões de gases, em relação ao sistema tradicional com irrigação contínua.

Muito embora o cultivo de plantas de cobertura tenha intensificado as emissões de GEE, bem como as variáveis PAGp e PAGpPG, é necessário que os benefícios advindos dessa prática, como o aumento nos estoques de C e N do solo, sejam devidamente avaliados no futuro, preferencialmente em experimentos de longa duração. Esses estudos são relevantes em razão do fato de que mais de 70% das áreas cultivadas com arroz no estado apresentam baixo teor de matéria orgânica ($\leq 2,5\%$) (Boeni et al., 2010).

Conclusões

1. A inserção de plantas de cobertura de inverno em Planossolo de terras baixas potencializa as emissões de CH₄ do cultivo de arroz cultivado em sucessão.

2. As emissões de N₂O dependem da qualidade do resíduo aportado e aumentam sensivelmente quando há inserção de leguminosas nos cultivos de cobertura.

3. A drenagem do solo favorece as emissões de N₂O, mas reduz drasticamente a emissão do CH₄, o que resulta em acentuada diminuição do potencial de aquecimento global parcial (PAGp).

4. Embora o aporte de resíduos aumente as emissões de CH₄, o PAGp e o PAGp por unidade de produtividade de grãos (PAGpPG), a drenagem do solo constitui uma prática com grande potencial em diminuir esses efeitos.

Agradecimentos

À Fundação de Apoio à Pesquisa no Estado do Rio Grande do Sul (Fapergs) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro; à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsas de mestrado, doutorado e pós-doutorado.

Referências

- ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] GRÃOS: safra 2014/15: quinto levantamento, Brasília, v.2, n.5, fev. 2015. 116p. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_02_13_10_34_06_boletim_gaos_fevereiro_2015.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2015.
- BAYER, C.; COSTA, F. de S.; PEDROSO, G.M.; ZSCHORNACK, T.; CAMARGO, E.S.; LIMA, M.A. de; FRIGHETO, R.T.S.; GOMES, J.; MARCOLIN, E.; MACEDO, V.R.M. Yield-scaled greenhouse gas emissions from flood irrigated rice under long-term conventional tillage and no-till systems in a Humid Subtropical climate. **Field Crops Research**, v.162, p.60-69, 2014. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.03.015.
- BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; PEDROSO, G.M.; ROSA, C.M. da; CAMARGO, E.S.; BOENI, M.; MARCOLIN, E.; REIS, C.E.S. dos; SANTOS, D.C. dos. A seven-year study on the effects of fall soil tillage on yield-scaled greenhouse gas emission from flood irrigated rice in a humid subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v.145, p.118-125, 2015. DOI: 10.1016/j.still.2014.09.001.
- BOENI, M.; ANGHINONI, I.; GENRO JÚNIOR, S.A.; OSÓRIO FILHO, B.D. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: Instituto Rio Grandense do Arroz, 2010. 40p. (Instituto Rio Grandense do Arroz. Boletim técnico, 10).
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 5.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27., 2007, Pelotas. **Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2007. 161p.
- COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v.40, p.436-443, 2000. DOI: 10.2135/cropsci2000.402436x.
- DALAL, R.C.; ALLEN, D.E.; LIVESLEY, S.J.; 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, p.43-76, 2008. DOI: 10.1007/s11104-007-9446-7.
- EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; MINX, J.C.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; STECHOW, C. von; ZWICKEL T. (Ed.). **Climate Change 2014: mitigation of climate change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- HOU, H.; PENG, S.; XU, J.; YANG, S.; MAO, Z. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China. **Chemosphere**, v.89, p.884-892, 2012. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.04.066.
- KIM, S.Y.; GUTIERREZ, J.; KIM, P.J. Considering winter cover crop selection as green manure to control methane emission during rice cultivation on paddy soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.161, p.130-136, 2012. DOI: 10.1016/j.agee.2012.07.026.
- KIM, S.Y.; LEE, C.H.; GUTIERREZ, J.; KIM, P.J. Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation. **Plant and Soil**, v.366, p.273-286, 2013. DOI: 10.1007/s11104-012-1403-4.
- LINQUIST, B.; GROENIGEN, K.J. van; ADVIENTO-BORBE, M.A.; PITTELKOW, C.; KESSEL, C. van. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. **Global Change Biology**, v.18, p.194-209, 2012. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02502.x.
- MA, K.; LU, Y. Regulation of microbial methane production and oxidation by intermittent drainage in rice field soil. **FEMS Microbiology Ecology**, v.75, p.446-456, 2011. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2010.01018.x.
- MINAMIKAWA, K.; SAKAI, N. The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy soils in Japan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.107, p.397-407, 2005. DOI: 10.1016/j.agee.2004.08.006.
- MINAMIKAWA, K.; YAGI, K.; TOKIDA, T.; SANDER, B.O.; WASSMAN, R. Appropriate frequency and time of day to measure methane emissions from an irrigated rice paddy in Japan using the manual closed chamber method. **Greenhouse Gas Measurement and Management**, v.2, p.118-128, 2012. DOI: 10.1080/20430779.2012.729988.
- MOTERLE, D.F.; SILVA, L.S. da; MORO, V.J.; BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; AVILA, L.A. de; BUNDT, A. da C. Methane efflux in rice paddy field under different irrigation managements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.431-437, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000200014.
- REDDY, K.R.; DELAUNE, R.D. **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**. Florida: CRC Press, 2008. 800p. DOI: 10.1201/9780203491454.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- SOLOMON, D.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER H. L. (Ed.). **Climate Change 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996p. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

TYAGI, L.; KUMARI, B.; SINGH, S.N. Water management – a tool for methane mitigation from irrigated paddy fields. **Science of the Total Environment**, v.408, p.1085-1090, 2010. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.010.

TOMA; Y.; HATANO, R. Effect of crop residue C:N ratio on N₂O emissions from Gray Lowland soil in Mikasa, Hokkaido, Japan. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.53, p.198-205, 2007. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2007.00125.x.

ZOU, J.; HUANG, Y.; ZHENG, X.; WANG, Y. Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: dependence on water regime. **Atmospheric Environment**, v.41, p.8030-8042, 2007. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.06.049.

ZSCHORNACK, T.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; VIEIRA, F.C.B.; ANGHINONI, I. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from flood-irrigated rice by no incorporation of winter crop residues into the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.623-634, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200031.

Recebido em 31 de agosto de 2015 e aprovado em 31 de maio de 2016