

**Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso
em Cultivo de Arroz Irrigado
Influenciados pelo Manejo da
Adubação Nitrogenada**



ISSN 1678-2518

Dezembro, 2017

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Embrapa Clima Temperado

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 274

Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado Influenciados pelo Manejo da Adubação Nitrogenada

Walkyria Bueno Scivittaro

Thaís Antolini Veçozzi

Renata Abreu Rodrigues

Thaís Murias Jardim

Lillian Medeiros Barros

Embrapa Clima Temperado

Pelotas, RS

2017

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Clima Temperado

Endereço: BR 392, Km 78

Caixa postal 403, CEP 96010-971 - Pelotas/RS

Fone: (53) 3275-8100

www.embrapa.br/clima-temperado

www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê de Publicações da Embrapa Clima Temperado

Presidente: *Ana Cristina Richter Krolow*

Vice-Presidente: *Enio Egon Sosinski Junior*

Secretária: *Bárbara Chevallier Cosenza*

Membros: *Ana Luiza Barragana Viegas, Fernando Jackson, Marilaine Schaun Pelufê, Sonia Desimon*

Revisão de texto: *Bárbara C. Cosenza*

Normalização bibliográfica: *Marilaine Schaun Pelufê*

Editoração eletrônica: *Nathália Coelho (estagiária)*

Foto de capa: *Walkyria Scivittaro*

1^a edição

Obra digitalizada (2017)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Clima Temperado

-
- F647 Fluxos de amônia e óxido nitroso em cultivo de arroz irrigado influenciados pelo manejo da adubação nitrogenada / Walkyria Bueno Scivittaro... [et al.]. – Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017. 40 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Clima Temperado, ISSN 1678-2518 ; 274)

1. Arroz irrigado. 2. Adubação. 3. Nitrogênio.
I. Scivittaro, Walkyria Bueno. II. Série.

Sumário

| | |
|-------------------------------------|----|
| Resumo | 5 |
| Abstract | 7 |
| Introdução | 9 |
| Material e Métodos | 12 |
| Resultados e Discussão | 17 |
| Conclusões | 32 |
| Referências | 33 |

Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado Influenciados pelo Manejo da Adubação Nitrogenada

Walkyria Bueno Scivittaro¹

Thaís Antolini Veçozzi²

Renata Abreu Rodrigues³

Thaís Murias Jardim⁴

Lillian Medeiros Barros⁵

Resumo

Os solos agrícolas representam a principal fonte de óxido nitroso (N_2O) para a atmosfera. O N_2O é um potente gás de efeito estufa (GEE), contribuindo para as mudanças climáticas e destruição da camada de ozônio. A amônia é (NH_3) é considerada uma fonte indireta de N_2O , visto que uma fração dos fertilizantes aplicados ao solo é volatilizada como NH_3 e, posteriormente, novamente depositada nos solos. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar os fluxos e estabelecer fatores de emissão de amônia ($N-NH_3$) e óxido nitroso ($N-N_2O$) para diferentes fertilizantes nitrogenados aplicados à cultura de arroz irrigado. O estudo foi realizado na safra 2016/2017, em Planossolo Háplico Eutrófico típico, no município de Capão do Leão, RS. Foram avaliados os seguintes tratamentos: testemunha com

¹Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS.

²Gestora Ambiental, doutoranda do Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faem/UFPel, Pelotas, RS.

³Graduanda em Gestão Ambiental, IFSul, Pelotas, RS.

⁴Graduanda em Agronomia, Faem/UFPel, bolsista PIBIC do CNPq, Pelotas, RS.

⁵Graduanda em Engenharia Química, IFSul, Pelotas-RS.

6 Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado Influenciados pelo Manejo da Adubação Nitrogenada

omissão da adubação nitrogenada e a dose recomendada de N para o arroz (120 kg ha⁻¹), como ureia; ureia protegida com o inibidor de urease NBPT; ureia protegida com o inibidor de nitrificação DCD; ureia protegida com NBPT e DCD; sulfato de amônio, parcelado em três aplicações (semeadura e nos estádios de quatro folhas e de iniciação da panícula); e ureia recoberta por polímero (fertilizante de liberação controlada), aplicada integralmente em pré-semeadura. Avaliaram-se as perdas de NH₃ do fertilizante por ocasião das adubações nitrogenadas (semeadura, inicio do perfilhamento e iniciação da panícula. As determinações de N₂O foram realizadas durante todo o ciclo da cultura, utilizando-se o método da câmara estática fechada. As fontes de N não interferiram nos fluxos de N do solo. A emissão de N₂O é a principal via de perda de nitrogênio do sistema solo-planta, variando de 1,96%, para a ureia/NBPT, a 2,87%, para a ureia/DCD, superando o valor de referência de 1% proposto pelo IPCC. A volatilização de NH₃ é uma fonte de perda de N de menor importância para o arroz irrigado, predominando em aplicações realizadas nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura. O sulfato de amônio apresenta menor fator de emissão de NH₃ (0,94%) que as fontes contendo ureia, variando de 1,21%, para a ureia/NBPT a 2,04%, para a ureia/DCD. Independentemente da fonte e manejo do N, os fatores de emissão de NH₃ no cultivo de arroz irrigado foram bem menores que o valor de referência proposto pelo IPCC, de 10%.

Termos para indexação: nitrogênio, adubo, gás de efeito estufa, fator de emissão.

Ammonia and Nitrous Oxide Fluxes from Flooded Rice as Affected by the Management of Nitrogen Fertilization

Abstract

Agricultural soil is a major source of nitrous oxide (N_2O). N_2O is a powerful greenhouse gas, and it contributes to climate change and the destruction of stratospheric ozone. Ammonia (NH_3) is considered an indirect source of N_2O , since a fraction of the nitrogen fertilizers applied to the soil volatilizes as NH_3 , and subsequently is deposited into the soils. The objective of this work was to evaluate the fluxes and to establish emission factors of ammonia ($N-NH_3$) and nitrous oxide ($N-N_2O$) for different nitrogen sources applied to irrigated rice. The study was carried out in 2016/2017 growing season, in a Planossolo (Typic Albaqualf), at Embrapa Temperate Agriculture, in Capão do Leão, State of Rio Grande do Sul, Brazil. The following treatments were evaluated: control with omission of nitrogen fertilization and the recommended dose of N for rice (120 kg ha^{-1}), such as urea; urea with the urease inhibitor NBPT (urea/NBPT); urea with the inhibitor of nitrification DCD (urea/DCD); urea with NBPT and DCD (urea/NBPT+DCD); ammonium sulfate (AS) split in three applications (seeding and at the four leaves and panicle initiation stages); and polymer coated urea (controlled-release fertilizer), fully applied in pre-sowing. NH_3 volatilization was evaluated after nitrogen fertilizations (sowing, and at the four leaves and panicle initiation stages). The air sampling for N_2O soil emission analysis was performed at least

8 Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado Influenciados pelo Manejo da Adubação Nitrogenada

once a week, using static closed chambers. Nitrogen sources did not interfere with soil N fluxes. N_2O emission is the main nitrogen loss pathway of the soil-plant system, varying from 1.96% for urea/NBPT to 2.87% for urea/DCD. All the emissions factors exceeded the reference value of 1% proposed by the IPCC. NH_3 volatilization is a minor N loss source for irrigated rice, predominating in applications carried out at the initial stages of crop development. Ammonium sulfate presents a lower NH_3 emission factor (0.94%) than urea-containing sources, ranging from 1.21%, for urea/NBPT, to 2.04%, for urea/DCD. Despite of the source and N management, NH_3 emission factors were lower than the IPCC reference value of 10%.

Index terms: *Nitrogen, fertilizer, greenhouse gas, emission factor.*

Introdução

O Brasil é o quarto consumidor mundial de fertilizantes, com demanda crescente da ordem de 5,8% ao ano nas últimas duas décadas. Das mais de 29,5 milhões de toneladas de fertilizantes consumidos em 2012, cerca de 66% foram importados (ANDA, 2013), colocando o país em uma frágil situação de dependência da importação desses insumos, especialmente quando se considera que a maior parte dos solos das regiões produtoras de alimentos, fibras e energia é naturalmente deficiente em nutrientes, requerendo o aporte, via adubação, para o aumento e, até mesmo, a manutenção dos níveis vigentes de produtividade das culturas.

Um aspecto relevante com relação à adubação das culturas refere-se à baixa eficiência de uso de nutrientes, exigindo a aplicação de quantidades de fertilizantes maiores que as efetivamente requeridas. Esse fato é particularmente importante para os fertilizantes nitrogenados, limitando a produtividade, onerando os custos de produção e ocasionando risco de poluição ambiental. O manejo inadequado de fertilizantes nitrogenados gera formas gasosas ou compostos solúveis (NH_3 , NO_x e N_2O), que poluem o ar e contaminam os mananciais hídricos com nitrato (NO_3^-) (JANTALIA et al., 2012).

A baixa eficiência da adubação nitrogenada é comumente verificada no cultivo de arroz irrigado (CASSMAN et al., 1998; FILLERY et al., 1984), devido à dinâmica complexa do nitrogênio (N) em solos alagados, envolvendo múltiplas formas químicas, reações e processos. Consequentemente, o manejo do N é uma prática desafiadora à lavoura de arroz irrigado, envolvendo a coordenação de fontes, doses, parcelamento, épocas e formas de aplicação do nutriente para maximizar a disponibilidade e otimizar seu aproveitamento pela cultura (FITTS et al., 2014).

Nos últimos anos, alternativas tecnológicas às fontes convencionais de N, tais como os sistemas de liberação controlada e lenta e fertilizantes contendo aditivos químicos e inibidores de urease e/ou nitrificação, têm sido massivamente liberadas no mercado nacional como forma de elevar a eficiência de fertilizantes nitrogenados. Contudo, essa diversidade de novos produtos ainda precisa ser criteriosamente avaliada pela pesquisa, com vistas ao estabelecimento de sua eficácia em diferentes sistemas de produção e condições edafoclimáticas, bem como de seu impacto ao meio ambiente. Com relação a esse último aspecto, destaca-se a necessidade de quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a definição de fatores de emissão para diferentes fontes de N em distintos sistemas de produção, visando sua sustentabilidade e a contabilização de carbono.

O óxido nitroso é um GEE cuja liberação para a atmosfera está fortemente associada ao uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, por aumentarem o conteúdo de N mineral no solo. Todavia, emissões diretas de N_2O decorrem, também, do uso de adubos orgânicos, cultivo de plantas fixadoras de N₂, incorporação ao solo de resíduos de colheita e da mineralização de N em solos orgânicos cultivados (IPCC, 1997).

Os solos são responsáveis por 36% das emissões globais de N_2O , estando sua produção associada à presença de fonte de carbono orgânico e dos íons amônio e nitrato (SCHLESINGER, 2013). No Brasil, as emissões de N_2O decorrentes do setor Agropecuária são bem mais significativas que a média mundial, representando 84,2% do total (BRASIL, 2016).

Os processos biológicos de nitrificação e desnitrificação são responsáveis pela geração de N_2O no solo. Em condições aeróbias, bactérias nitrificadoras convertem amônio a nitrato, podendo resultar na emissão de N_2O , como produto intermediário das reações de

oxidação do nitrogênio (N). Mas em condições anaeróbias, o N_2O é gerado em processo respiratório, no qual os óxidos de N atuam com receptores finais de elétrons (CANTARELLA, 2007).

O balanço entre a produção e o consumo de N_2O no solo depende de diversos mecanismos físicos, que variam com a temperatura e umidade (RAFIQUE et al., 2011). Da mesma forma, o manejo da adubação nitrogenada, por alterar a disponibilidade de N no solo, pode promover variações nas emissões de N_2O .

Outra importante via de perda de N de fertilizantes no solo é a volatilização de amônia (NH_3) (MA et al., 2010). Trata-se da forma mais reduzida de N reativo presente na atmosfera, cuja concentração tem crescido devido à atividade humana (ANEJA et al., 2003). A agricultura responde por de 20 a 80% das emissões de N- NH_3 em áreas agrícolas (MISSELBROOK et al., 2000; ANEJA et al., 2008).

Para fins de contabilização de emissões de GEE, a amônia é considerada uma fonte indireta de N_2O , visto que uma fração dos fertilizantes aplicados ao solo é volatilizada como NH_3 e, posteriormente, novamente depositada nos solos (ALVES, 2015; IPCC, 1997).

A volatilização de amônia está fortemente associada ao uso de ureia, principal fonte de N para os cultivos agrícolas no Brasil, devido ao elevado conteúdo de N e menor custo por unidade do nutriente aplicado. Apesar desses aspectos favoráveis, esse fertilizante apresenta reação inicial alcalina no solo, favorecendo as perdas como NH_3 , quando aplicado em superfície. Além da atividade da urease, enzima que controla a taxa de hidrólise da ureia no solo, a intensidade das perdas de NH_3 é influenciada pela interação de fatores edáficos e ambientais, sendo proporcional à concentração de amônia na solução do solo (ANJOS; TEDESCO, 1976; XU et al., 1993).

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar os fluxos e estabelecer fatores de emissão de amônia (N-NH_3) e óxido nitroso ($\text{N-N}_2\text{O}$) para diferentes fertilizantes nitrogenados aplicados à cultura de arroz irrigado.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido na safra agrícola 2016/17, na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS. O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico típico (CUNHA; COSTA, 2013), apresentando as seguintes características químicas, na profundidade de 0 a 20 cm, por ocasião da instalação do experimento: pH(água): 5,6; 11 g dm^{-3} de MO; 7,8 mg dm^{-3} de P; 32 mg dm^{-3} de K; 0,1 cmol_c dm^{-3} de Al; 1,3 cmol_c dm^{-3} de Ca; 0,5 cmol_c dm^{-3} de Mg e saturação por bases de 43%. Os teores de matéria orgânica, fósforo e potássio são interpretados, respectivamente, como baixo, alto e baixo para a cultura de arroz irrigado, conforme SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO (2016).

Avaliaram-se sete tratamentos, sendo uma testemunha com omissão da adubação nitrogenada e seis fontes de nitrogênio para o arroz: (ureia; ureia+NBPT: ureia tratada com o inibidor de urease N-(n-butil) triamida tiofosfórica (NBPT); ureia+DCD: ureia tratada com o inibidor de nitrificação dicianodiamida (DCD); ureia+NBPT+DCD: ureia tratada com os inibidores NBPT e DCD; FLC: fertilizante de liberação controlada (ureia recoberta com polímeros de poliacrilatos não hidrossolúveis, apresentando 20%, 80% e 100% do N liberado em até 15, 60 e 90 dias após a aplicação, respectivamente); e sulfato de amônio. Os tratamentos foram dispostos em delineamento de blocos ao acaso com três repetições.

Para os tratamentos com aplicação de fonte de N, a dose utilizada foi de 120 kg ha⁻¹, estabelecida com base nos resultados da análise de solo e considerando uma expectativa de resposta alta da cultura à adubação (SOSBAI, 2016). Com exceção do fertilizante de liberação controlada, que foi aplicado integralmente a lanço em superfície, imediatamente antes da semeadura do arroz, as demais fontes de N foram parceladas em três aplicações: localizada no sulco de semeadura (15 kg ha⁻¹ de N, exclusivamente como ureia, contida na formulação utilizada na adubação básica de semeadura) e em cobertura, sendo 52,5 kg ha⁻¹ de N aplicados no início do perfilhamento (estádio V4) e 52,5 kg ha⁻¹ de N, na iniciação da panícula (estádio R0). A primeira adubação nitrogenada em cobertura foi realizada em solo seco, com três dias de antecedência do início da irrigação definitiva, e a segunda, sobre uma lâmina de água não circulante.

A cultivar de arroz irrigado de ciclo precoce PUITÁ INTA-CL foi semeada em 7 de novembro de 2016, em área preparada em sistema convencional, utilizando-se um espaçamento entrelinhas de 17,5 cm e densidade de 110 kg ha⁻¹ de sementes. Como adubação básica, aplicaram-se de forma localizada no sulco de semeadura 300 kg ha⁻¹ da formulação 5-25-25. As parcelas relativas aos tratamentos testemunha e com uso de fertilizante de liberação controlada, receberam, porém, a aplicação de fontes simples de fósforo (superfosfato triplo) e potássio (cloreto de potássio) a lanço e incorporadas com grade em pré-semeadura. O controle de plantas daninhas e os demais tratos culturais para o arroz foram estabelecidos de acordo com as indicações técnicas para a cultura nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (SOSBAI, 2016). Para o acompanhamento dos estádios de desenvolvimento das plantas de arroz, utilizou-se, como referência, a escala de desenvolvimento de Counce et al. (2000).

A avaliação das perdas de N por volatilização de amônia foi realizada por um período de 21 dias, por ocasião das adubações nitrogenadas

para a cultura (semeadura, início do perfilhamento e iniciação da panícula). Nas três épocas utilizaram-se coletores construídos seguindo modelo de Nömmik (1973), modificado por Cantarella et al. (2003). Os coletores consistiram de tubos vazados, em PVC, com 25,4 cm de diâmetro interno e 50 cm de altura, nos quais foram dispostos dois discos de espuma de polietileno com 2 cm de espessura, a 2,5 cm e 15 cm da extremidade superior. Ambos os discos de espuma foram impregnados com solução de ácido fosfórico e glicerina para adsorver a amônia volatilizada, que foi extraída com solução molar de cloreto de potássio e determinada por destilação por arraste de vapor. O disco superior destinou-se à adsorção de possíveis contaminações de NH_3 proveniente da atmosfera e o inferior, daquela oriunda dos fertilizantes. A extremidade superior do tubo foi coberta com filme plástico afixado com cinta de látex e por um tampo em madeira. As câmaras de volatilização foram enterradas no interior das parcelas experimentais até a profundidade de 10 cm.

Em cada época de avaliação, as determinações de amônia volatilizada foram feitas no 1º; 2º; 4º; 7º; 14º e 21º dias após a aplicação dos fertilizantes, visto que os fluxos de NH_3 concentram-se no período posterior à aplicação dos fertilizantes nitrogenados (MADARI et al., 2011). Calcularam-se, ainda, as perdas de NH_3 proveniente dos fertilizantes em cada coleta, subtraindo-se os valores medidos na testemunha sem N, e as perdas acumuladas ao longo do período de avaliação.

Por sua vez, as amostragens de ar para determinação das emissões de N_2O foram realizadas em intervalos regulares de aproximadamente sete dias, iniciando um dia antes da semeadura do arroz e estendendo-se até uma semana após sua colheita. Excepcionalmente, por ocasião das adubações nitrogenadas, as avaliações foram intensificadas, sendo realizadas em intervalos médios de dois dias durante uma semana.

Nas amostragens, utilizou-se o método da câmara estática fechada (MOSIER, 1989). Para tanto, dispuseram-se nas parcelas experimentais um sistema coletor de gases de efeito estufa (base + extensor(es) + câmara).

As bases, confeccionadas em alumínio, apresentam formato quadrado (64 cm x 64 cm) e 30 cm de altura. Essas foram inseridas no solo a uma profundidade de 5 cm. Acima da superfície do solo, em dois lados opostos, as bases dispõem de dois orifícios com diâmetro de 2,5 cm, que permitem, quando presente, a circulação de água da área experimental para o interior do sistema coletor. Esses orifícios foram fechados durante os períodos de coletas, utilizando-se rolha de borracha. Apenas as bases dos sistemas coletores permaneceram nas parcelas experimentais durante todo o período de avaliação.

Durante as coletas, câmaras de alumínio foram dispostas sobre as bases. Quando as plantas de arroz atingiram alturas superiores a do conjunto base-câmara, um ou dois extensores, conforme a necessidade, foram colocados entre as bases e as câmaras. Os conjuntos base-extensores-câmara foram fechados hermeticamente durante as coletas, pela colocação de água em canaletas existentes na parte superior das bases e dos extensores (GOMES et al., 2009).

As amostragens de ar foram realizadas sempre no período da manhã, entre 9h e 12h, horário em que os fluxos de emissão de gases de efeito estufa são representativos das emissões médias diárias na região Sul do Brasil (COSTA et al., 2008). As amostras de ar do interior das câmaras foram tomadas manualmente com auxílio de seringas de polipropileno (20 mL) nos tempos 0, 5, 10 e 20 minutos após seu fechamento. O ar no interior das câmaras era homogeneizado durante 30 segundos antes de cada amostragem, por meio de ventiladores presentes na parte superior das câmaras e a temperatura interna, monitorada com auxílio de termômetro digital de haste com visor externo.

Durante os períodos de amostragens, as seringas eram acondicionadas em caixas térmicas e mantidas sob resfriamento, sendo o ar armazenado transferido, imediatamente após, para frascos específicos dotados de vácuo. As precipitações ocorridas ao longo do período de avaliação foram monitoradas continuamente.

As concentrações de N_2O nas amostras de ar foram determinadas por cromatografia gasosa, no laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Por sua vez, os fluxos de N_2O do solo (taxas de emissão) foram calculados pela relação linear entre a variação na concentração desses gases e o tempo de coleta, segundo a Equação 1:

$$f = \frac{dC}{dt} \frac{MPV}{RT} \frac{1}{A} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: dC/dt corresponde à mudança na concentração de N_2O (mmol mol^{-1}) no intervalo de tempo t (min); M é o peso molecular do N_2O (g mol^{-1}); P é a pressão (atm) no interior da câmara (assumida como 1,0 atm); V e T correspondem ao volume da câmara (L) e à temperatura interna (K); R é a constante universal dos gases ($0,08205 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) e A é a área da base da câmara (m^2).

A taxa de aumento de N_2O no interior das câmaras foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração do gás e o tempo. A emissão total do período foi calculada pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de N_2O do solo (GOMES et al., 2009).

Com base nas emissões acumuladas de NH_3 e N_2O derivadas de cada fertilizante nitrogenado, descontando-se as emissões medidas na área

não adubada com nitrogênio (testemunha), calcularam-se os fatores de emissão desses gases para cada fonte de N.

Os fluxos e as emissões totais de NH_3 e N_2O foram analisados de forma descritiva (média ± desvio padrão).

Resultados e Discussão

Emissão de amônia

Por ocasião da semeadura do arroz, as avaliações de amônia volatilizada restringiram-se a três tratamentos (testemunha, ureia e FLC), visto que as demais fontes de N foram utilizadas apenas nas adubações em cobertura. Durante o período de avaliação, as perdas de NH_3 decorrentes da utilização de ureia e fertilizante de liberação controlada – FLC (ureia recoberta com polímero) – totalizaram 0,685 e 1,161 kg ha^{-1} de N, respectivamente (Tabela 1), correspondendo, respectivamente, a 4,6% e 1,1% do N aplicado (Figura 1). Na comparação das fontes de N, cabe destacar que as perdas decorrentes do FLC estão associadas à aplicação da dose integral de N recomendada para o arroz, enquanto que, para a ureia, foram utilizados apenas 12,5% da dose. Esse resultado demonstra efetividade do recobrimento da molécula de ureia por polímeros como forma de prevenir perdas de NH_3 no período subsequente à aplicação ao solo, especialmente quando se considera que a volatilização de amônia da ureia está associada a adubações que promovem concentrações elevadas de N amoniacal na camada superficial do solo, decorrente da ausência ou incorporação inadequada do fertilizante (PHONGPAN et al., 1995), sendo mais intensa quando são aplicadas doses elevadas de N nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura (VLEK et al., 1980), condições essas vigentes no manejo preconizado para o FLC.

Além da diferença em magnitude, a variação temporal das perdas de NH_3 derivada das duas fontes de N também foi distinta. Para a ureia,

as perdas iniciaram já no primeiro dia após a aplicação do fertilizante, aumentando de forma acentuada até o sétimo dia, a partir do qual embora mantido, o incremento na liberação de NH_3 apresentou intensidade reduzida. Já as perdas do FLC iniciaram apenas após o segundo dia da aplicação; aumentando até o sétimo dia da aplicação, quando a taxa de crescimento também diminuiu bastante (Figura 1).

Tabela 1. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH_3) derivadas da aplicação de fertilizantes nitrogenados à cultura de arroz irrigado. Dados relativos à adubação realizada na semeadura. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2016/2017.

| Fonte de N ¹ | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 5 ^a | 6 ^a | Total |
|--|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | coleta 1 DAF ² | coleta 2 DAF | coleta 4 DAF | coleta 7 DAF | coleta 14 DAF | coleta 21 DAF | |
| kg ha^{-1} de N-NH_3 | | | | | | | |
| Ureia | 0,038 ± 0,029 | 0,157 ± 0,045 | 0,295 ± 0,115 | 0,104 ± 0,029 | 0,036 ± 0,025 | 0,055 ± 0,015 | 0,685 ± 0,125 |
| FLC | 0,046 ± 0,020 | 0,026 ± 0,009 | 0,226 ± 0,205 | 0,379 ± 0,205 | 0,330 ± 0,298 | 0,154 ± 0,093 | 1,161 ± 0,402 |

¹Fontes de N: Ureia; FLC (fertilizante de liberação controlada).

²DAF: dias após a aplicação do fertilizante nitrogenado.

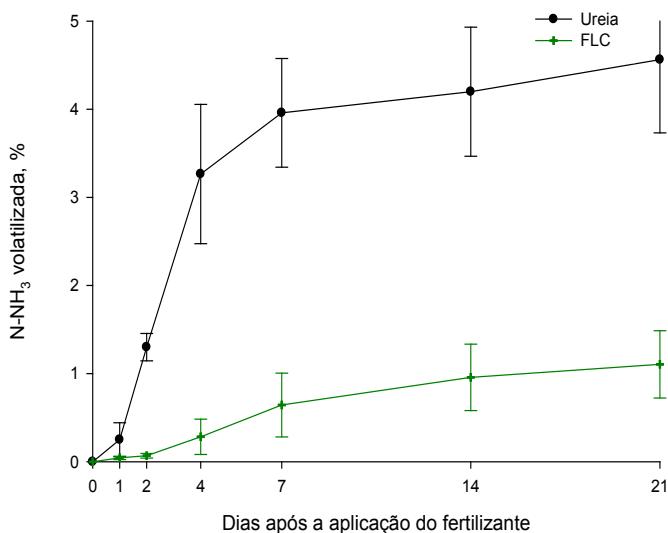


Figura 1. Perdas acumuladas de nitrogênio como amônia ($N\text{-NH}_3$) derivadas da aplicação de fertilizantes nitrogenados à cultura de arroz irrigado. Barras verticais representam o desvio padrão da média. Dados relativos à adubação realizada na semeadura. Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, safra 2016/2017.

Também por ocasião da primeira cobertura com N, quando foram aplicados $52,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N ao arroz, com exceção do FLC, as perdas de N por volatilização de amônia NH_3 foram baixas para todas as fontes de nitrogênio, variando de $0,195 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, para o sulfato de amônio, a $1,344 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, para a ureia tratada com o inibidor de nitrificação DCD (Tabela 2), correspondendo, respectivamente, a 0,4% e 2,6% da quantidade de fertilizante aplicada ao arroz. A baixa magnitude das perdas de NH_3 para todas as fontes avaliadas indica que, para o arroz produzido no sistema de semeadura em solo seco, o manejo adequado do N, com a aplicação do fertilizante antecedendo o início da irrigação

da cultura (até três dias antes, de acordo com indicações de Sosbá (2016), condiciona um ambiente estável para a manutenção do N da ureia na forma amoniacal ($\text{N}-\text{NH}_4^+$), dispensando o uso de fontes de eficiência aumentada para as minimizar perdas de NH_3 . Nessa condição de manejo, o arroz apresenta elevada eficiência de uso do N, alcançando valores entre 65% e 75% do total aplicado (NORMAN et al., 2003). A análise comparativa das fontes mostra que, sob manejo adequado do N, o uso de inibidor de urease NBPT não proporcionou ganhos relativamente à ureia comum quanto à minimização de perdas de NH_3 . Comportamento distinto foi verificado, porém, quando a ureia foi aplicada com dez dias de antecedência do início da irrigação do arroz, onde o NBPT reduziu as perdas de NH_3 em 88% e 83% relativamente à ureia comum em solo úmido e saturado, respectivamente (SCIVITTARO et al., 2010). Esse resultado demonstra que a efetividade do NBPT está associada à ocorrência de condições que favorecem a volatilização de NH_3 da ureia. O inibidor de nitrificação DCD, sem ação direta sobre a ação da urease, intensificou a volatilização de NH_3 da ureia, quando utilizado de forma isolada ou associada ao NBPT (Tabela 2).

Com relação à volatilização de amônia derivada da ureia ao longo do período de avaliação, as perdas foram pequenas no primeiro dia após a aplicação, aumentando de forma marcante até o quarto dia, estabilizando-se a partir de então, coincidindo com o momento de submersão do solo (Figura 2). As perdas de NH_3 associadas ao uso de sulfato de amônio e FLC foram desprezíveis ao longo de todo o período de avaliação, representando menos da metade daquela medida para a ureia. Esse comportamento é atribuído ao fato de o FLC ter sido aplicado integralmente na semeadura, reduzindo o potencial de perdas em fase posterior do desenvolvimento da cultura. Por sua vez, o sulfato de amônio, por trata-se de um fertilizante com característica ácida, apresenta menor potencial de perdas de N por volatilização de amônia que a ureia (VILLAS BÔAS, 1995).

Tabela 2. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH_3) derivadas da aplicação de fertilizantes nitrogenados à cultura de arroz irrigado. Dados relativos à primeira adubação nitrogenada em cobertura, realizada no início do perfilhamento das plantas de arroz (estádio V4). Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, safra 2016/2017.

| Fonte de N ¹ | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 5 ^a | 6 ^a | Total |
|--|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | coleta | coleta | coleta | coleta | coleta | coleta | |
| | 1 DAF ² | 2 DAF | 4 DAF | 7 DAF | 14 DAF | 21 DAF | |
| kg ha^{-1} de N-NH_3 | | | | | | | |
| Ureia | 0,018 ± 0,023 | 0,040 ± 0,009 | 0,223 ± 0,036 | 0,044 ± 0,003 | 0,073 ± 0,058 | 0,018 ± 0,001 | 0,417 ± 0,050 |
| Ureia/NBPT | 0,013 ± 0,018 | 0,101 ± 0,088 | 0,134 ± 0,159 | 0,086 ± 0,107 | 0,070 ± 0,034 | 0,018 ± 0,001 | 0,423 ± 0,071 |
| Ureia/DCD | 0,163 ± 0,179 | 0,850 ± 0,710 | 0,193 ± 0,302 | 0,053 ± 0,040 | 0,061 ± 0,048 | 0,024 ± 0,013 | 1,344 ± 1,099 |
| Ureia/ NBPT+DCD | 0,099 ± 0,068 | 0,338 ± 0,097 | 0,217 ± 0,250 | 0,041 ± 0,009 | 0,036 ± 0,007 | 0,039 ± 0,037 | 0,771 ± 0,265 |
| FLC | 0,045 ± 0,048 | 0,038 ± 0,003 | 0,017 ± 0,010 | 0,033 ± 0,010 | 0,053 ± 0,008 | 0,018 ± 0,001 | 0,205 ± 0,042 |
| Sulfato amônio | 0,006 ± 0,006 | 0,023 ± 0,011 | 0,016 ± 0,010 | 0,096 ± 0,107 | 0,034 ± 0,025 | 0,018 ± 0,005 | 0,195 ± 0,095 |

¹Fontes de N: Ureia; Ureia/NBPT (ureia protegida com o inibidor de urease NBPT); Ureia/DCD (ureia protegida com o inibidor de nitrificação DCD); Ureia/NBPT+DCD (ureia protegida com os inibidores NBPT e DCD); FLC (fertilizante de liberação controlada); e Sulfato de amônio.

²DAF: dias após a aplicação do fertilizante nitrogenado.

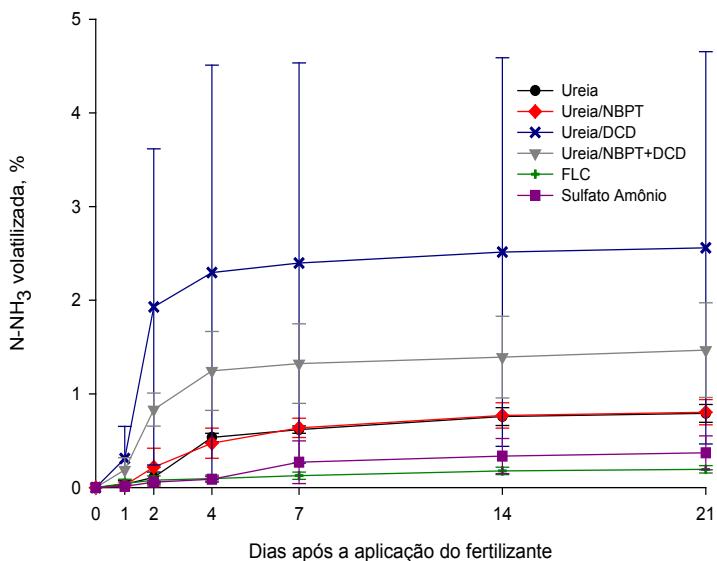


Figura 2. Perdas acumuladas de nitrogênio como amônia (N-NH_3) derivadas da aplicação de fertilizantes nitrogenados à cultura de arroz irrigado. Barras verticais representam o desvio padrão da média. Dados relativos à primeira adubação nitrogenada em cobertura, realizada no início do perfilhamento das plantas de arroz (estádio V4). Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, safra 2016/2017.

Na iniciação da panícula, quando foi realizada a segunda adubação nitrogenada em cobertura para o arroz, as perdas de NH_3 foram ainda menores que no início do perfilhamento, variando de $0,247 \text{ kg ha}^{-1}$ (0,5% do N aplicado), para o sulfato de amônio, a $0,489 \text{ kg ha}^{-1}$ (0,9% do N aplicado), para a ureia (Tabela 3). Nota-se, ainda, que as diferenças entre as fontes de N, especialmente aquelas contendo ureia foram ainda menores que nas avaliações anteriores, a despeito de os fertilizantes (com exceção para o FLC) terem sido aplicados sobre a lâmina de água, condição favorável a perdas de N por volatilização de NH_3 , pela impossibilidade de incorporação ao solo pela água de irrigação. Contudo, no início da fase reprodutiva, a eficiência de absorção de

N pelas plantas de arroz é bem maior que início do perfilhamento, visto que apresentam sistema radicular bem desenvolvido localizado na camada superficial do solo, favorecendo a rápida absorção do N aplicado e, portanto, minimizando as perdas de NH_3 (NORMAN et al., 2003), o que explica a ausência de diferença entre as fontes de N quanto à volatilização de amônia.

Apesar dos baixos valores absolutos, a variação no tempo das perdas de NH_3 derivada dos fertilizantes restringiu-se, basicamente, à ureia no início do período de avaliação. Para essa fonte, as perdas foram mais acentuadas já no primeiro dia após a aplicação, enquanto que para as demais fontes, a volatilização foi menor no primeiro dia, intensificando, porém, no segundo dia, quando a intensidade de perdas da ureia foi mais baixa. A partir do segundo dia da aplicação, o comportamento das fontes foi aproximadamente semelhante, com maior intensidade de perdas até o sétimo dia, quando a taxa de volatilização reduziu bastante até o final do período de avaliação (Figura 3).

Tabela 3. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH_3) derivadas da aplicação de fertilizantes nitrogenados à cultura de arroz irrigado. Dados relativos à segunda adubação nitrogenada em cobertura, realizada na iniciação da panícula das plantas de arroz (estádio R0). Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2016/2017.

| Fonte de N ¹ | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 5 ^a | 6 ^a | Total |
|--------------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | coleta 1 DAF ² | coleta 2 DAF | coleta 4 DAF | coleta 7 DAF | coleta 14 DAF | coleta 21 DAF | |
| kg ha^{-1} de N | | | | | | | |
| Ureia | 0,154 ± 0,160 | 0,054 ± 0,035 | 0,064 ± 0,039 | 0,096 ± 0,079 | 0,055 ± 0,024 | 0,066 ± 0,045 | 0,490 ± 0,286 |
| Ureia/NBPT | 0,027 ± 0,015 | 0,179 ± 0,096 | 0,048 ± 0,046 | 0,058 ± 0,003 | 0,021 ± 0,015 | 0,021 ± 0,010 | 0,354 ± 0,110 |
| Ureia/DCD | 0,072 ± 0,050 | 0,158 ± 0,177 | 0,055 ± 0,034 | 0,055 ± 0,002 | 0,043 ± 0,009 | 0,043 ± 0,013 | 0,425 ± 0,232 |
| Ureia/NBPT + DCD | 0,066 ± 0,033 | 0,142 ± 0,011 | 0,046 ± 0,025 | 0,075 ± 0,038 | 0,058 ± 0,009 | 0,063 ± 0,036 | 0,451 ± 0,026 |

| Fonte de N ¹ | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 5 ^a | 6 ^a | Total |
|--------------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | coleta | coleta | coleta | coleta | coleta | coleta | |
| | 1 DAF ² | 2 DAF | 4 DAF | 7 DAF | 14 DAF | 21 DAF | |
| kg ha⁻¹ de N | | | | | | | |
| FLC | 0,036 ± 0,008 | 0,128 ± 0,055 | 0,023 ± 0,008 | 0,042 ± 0,021 | 0,028 ± 0,013 | 0,076 ± 0,080 | 0,333 ± 0,049 |
| Sulfato amônio | 0,030 ± 0,014 | 0,048 ± 0,030 | 0,023 ± 0,013 | 0,058 ± 0,020 | 0,040 ± 0,021 | 0,048 ± 0,037 | 0,247 ± 0,058 |

¹Fontes de N: Ureia; Ureia/NBPT (ureia protegida com o inibidor de urease NBPT); Ureia/DCD (ureia protegida com o inibidor de nitrificação DCD); Ureia/NBPT+DCD (ureia protegida com os inibidores NBPT e DCD); FLC (fertilizante de liberação controlada); e Sulfato de amônio.

²DAF: dias após a aplicação do fertilizante nitrogenado.

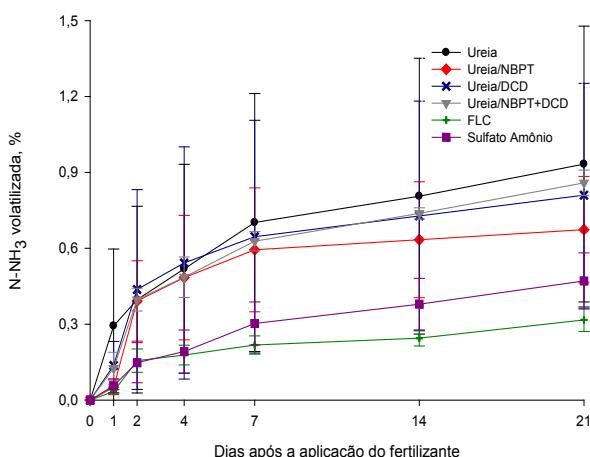


Figura 3. Perdas acumuladas de nitrogênio como amônia ($N-NH_3$) derivadas da aplicação de fertilizantes nitrogenados à cultura de arroz irrigado. Barras verticais representam o desvio padrão da média. Dados relativos à segunda adubação nitrogenada em cobertura, realizada na iniciação da panícula das plantas de arroz (estádio R0). Embrapa ClimaTemperado, Capão do Leão, RS, safra 2016/2017.

A totalização das perdas de N por volatilização de NH_3 das três épocas de adubação nitrogenada para a cultura de arroz irrigado foi relativamente baixa independentemente da fonte de N (Tabela 4). Menores perdas foram determinadas para o sulfato de amônio (1,125 kg ha^{-1} de N), fertilizante que por sua característica ácida apresenta baixo potencial de perdas por volatilização de NH_3 (VILLAS BÔAS, 1995). De outra forma, a ureia tratada com o inibidor de nitrificação DCD, isoladamente ou combinado ao inibidor de urease NBPT, proporcionou as maiores perdas de NH_3 entre as fontes avaliadas, inclusive à ureia comum. O DCD é um inibidor químico da nitrificação, que elimina ou afeta o metabolismo de bactérias do gênero *Nitrossomonas* (NELSON; HUBER, 1992) e, consequentemente, retarda a oxidação a nitrato (NO_3^-) do amônio (NH_4^+), liberado pela ureia, potencializando as perdas por volatilização de amônia. A presença do inibidor NBPT aparentemente minimizou esse efeito, afetando a atividade da urease e hidrólise da ureia. Ao longo do ciclo de cultivo do arroz, o desempenho da ureia recoberta com polímero (FLC) e com o inibidor de urease NBPT foi semelhante ao da ureia comum, reforçando observações de que sob manejo adequado do N, especialmente a aplicação em solo seco, seguida de incorporação pela lâmina de água, a cultura de arroz irrigado apresenta elevada eficiência de uso do N da ureia (NORMAN et al., 2003), equiparando-se a de fontes com eficiência aumentada.

Com relação ao fator de emissão de NH_3 das diferentes fontes de N utilizadas na cultura de arroz irrigado, esse variou de menos de 1%, para o sulfato de amônio, a pouco mais de 2% para a ureia tratada com o inibidor de nitrificação DCD; a ureia assim como as demais fontes de N apresentaram fatores de emissão de amônia intermediário, próximo de 1,5% (Tabela 4). Independentemente do fertilizante nitrogenado, os valores dos fatores de emissão (FE) de NH_3 determinados no presente estudo em cultivo de arroz irrigado desenvolvido na região subtropical do Brasil são bem menores que o valor de referência proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, que é de 10% para N- NH_3 (IPCC, 1997)). Em estudo semelhante desenvolvido para a

cultura de feijoeiro irrigado em Latosso Vermelho distroférreo da região do Cerrado, Madari et al. (2011), determinaram valores de FE de NH_3 variando de 0,6%, para o nitrato de amônio, a 9,9% do N aplicado, para a ureia.

Tabela 4. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH_3) derivado de fertilizantes nitrogenados em cultivo de arroz irrigado. Dados relativos às adubações nitrogenadas realizadas na semeadura, início do perfilhamento e iniciação da panícula. Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, safra 2016/2017.

| Fonte de N1 | Perda de N-NH_3 kg ha^{-1} de N | Perda de N-NH_3 (Fator emissão) |
|----------------|--|---|
| | | % N aplicado |
| Ureia | 1,590 \pm 0,154 | 1,325 \pm 0,490 |
| Ureia/NBPT | 1,460 \pm 0,102 | 1,217 \pm 0,392 |
| Ureia/DCD | 2,452 \pm 0,485 | 2,043 \pm 1,122 |
| Ureia/NBPT+DCD | 1,905 \pm 0,139 | 1,588 \pm 0,462 |
| FLC | 1,697 \pm 0,164 | 1,616 \pm 0,156 |
| Sulfato amônio | 1,125 \pm 0,093 | 0,938 \pm 0,374 |

¹Fontes de N: Ureia; Ureia/NBPT (ureia protegida com o inibidor de urease NBPT); Ureia/DCD (ureia protegida com o inibidor de nitrificação DCD); Ureia/NBPT+DCD (ureia protegida com os inibidores NBPT e DCD); FLC (fertilizante de liberação controlada); e Sulfato de amônio.

²DAF: dias após a aplicação do fertilizante nitrogenado.

Fluxo e emissão total de óxido nitroso

Os fluxos de óxido nitroso do solo associados ao uso de fertilizantes nitrogenados em cultivo de arroz irrigado variaram amplamente ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, determinando-se oscilações entre fluxos negativos (influxos) e emissões de N_2O de elevada magnitude (Figura 4). Entre o primeiro e o sétimo dia após a semeadura do arroz (DAS) determinaram-se fluxos de intensidade moderada, variando de 482 a 1.467 mg N_2O ha^{-1} h^{-1} , respectivamente, para os tratamentos testemunha sem N e com aplicação de ureia. Nesse período, as emissões decorrentes do uso do fertilizante de

liberação controlada (ureia recoberta com polímero) foram bastante próximas às da ureia, apesar da grande diferença nas doses aplicadas dessas fontes por ocasião da semeadura (15 kg ha⁻¹ de N, para a ureia, e 120 kg ha⁻¹ de N, para o FLC). Esse resultado indica a efetividade da cobertura com polímero em reduzir a taxa de liberação de formas minerais de N no solo, minimizando o potencial de emissão de N₂O. É importante considerar, ainda, que uma fração representativa das emissões medidas nesse período (>60%) esteve associada ao N nativo do solo, avaliado pelo tratamento testemunha, demonstrando que a contribuição dos fertilizantes nitrogenados para as emissões de N₂O é pequena no período imediatamente posterior à aplicação. Na sequência, entre o 11º e 28º DAS, determinaram-se quatro picos consecutivos de emissão de N₂O para os três tratamentos sob avaliação nesse período, atingindo, respectivamente, 5.020 e 13.936 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ no 21º DAS, para os tratamentos testemunha e FLC, e 21.625 no 28º DAS, para a ureia. Atribuem-se as elevadas emissões de N₂O determinadas nesse período à presença de formas minerais de N nativo do solo ou oriundas dos fertilizantes aplicados por ocasião da semeadura do arroz, associada à alternância no estado de oxirredução do solo, ocasionada por dois eventos subsequentes de precipitação (10º e 11º DAS) (Figura 4), favorecendo os processos de nitrificação e desnitrificação (SIGNOR et al., 2013). A disponibilidade de N mineral e o conteúdo de água no solo são os fatores mais relevantes e determinantes de emissões de N₂O (SKIBA; SMITH, 2000).

No 28º DAS, procedeu-se à primeira adubação nitrogenada em cobertura para o arroz, incluindo, além da ureia, outras quatro fontes de N (ureia/NBPT, ureia/DCD, Ureia/NBPT+DCD e sulfato de amônio), visto que o FLC foi aplicado integralmente na semeadura. A aplicação de N foi feita sobre solo saturado, em razão de chuva intensa ocorrida no dia anterior, condição essa que é favorável à hidrólise da ureia e que dificulta sua incorporação ao solo pela água de irrigação. Nos dois dias subsequentes à cobertura com N, com exceção da testemunha, foram determinados picos de emissão de N₂O de elevada magnitude,

atingindo 18.386; 14.202; 20.541; 16.991; 21.721 e 17.709 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹, para a ureia, ureia/NBPT, ureia/DCD, Ureia/NBPT+DCD, FLC e sulfato de amônio, respectivamente. Três dias após a cobertura com N, procedeu-se à irrigação do arroz por inundação do solo, estabelecendo-se uma lâmina de água contínua até o final do ciclo da cultura. Já a partir do primeiro dia após a inundação da lavoura de arroz (32 DAS), os fluxos de N₂O do solo reduziram drasticamente, independentemente da fonte de N utilizada, observando-se até o final do período de avaliação (uma semana após a colheita do arroz) alternância entre fluxos de baixa e, ocasionalmente, média intensidade e influxos de N₂O. Esse comportamento manteve-se constante mesmo após a segunda adubação nitrogenada em cobertura, procedida sobre uma lâmina de água não circulante, no 95° DAS para os tratamentos com uso de ureia, ureia/NBPT, ureia/DCD, ureia/NBPT+DCD e sulfato de amônio (Figura 4). Atribui-se esse comportamento à estabilidade na condição de solo reduzido estabelecida após a inundação do solo. Assim, mesmo na presença de formas minerais de nitrogênio no solo, não havia condição favorável à oxidação do íon amônio (NH₄⁺) a nitrato (NO₃⁻) (nitrificação), com a liberação de N₂O como produto intermediário. Em acréscimo, a demanda crescente de nitrogênio da planta de arroz, a partir do início do perfilhamento, proporcionando rápida absorção do N pela planta (NORMAN et al., 2002), reduz os riscos de perdas do nutriente do sistema solo-planta.

Na comparação entre os fertilizantes nitrogenados, verifica-se que, além da testemunha, os tratamentos FLC e sulfato de amônio apresentaram maior frequência de eventos de influxo de N₂O a partir do 68° DAS, relativamente às demais fontes de N, o que pode representar um diferencial ao uso dessas fontes de N para a cultura. Em solos cultivados com arroz irrigado por inundação, os fluxos de N₂O normalmente ocorrem em níveis baixos (IIDA et al., 2007; LIU et al., 2010), podendo ocorrer influxos desse GEE em determinados momentos, que representam absorção pelo solo (CAI et al., 1997;

HOU et al., 2000). A absorção de N_2O ocorre por ação de bactérias desnitrificadoras, que reduzem o N_2O a N_2 sob condições anaeróbias, devido à baixa concentração de NO_3^- (CHAPUIS-LARDY et al., 2007).

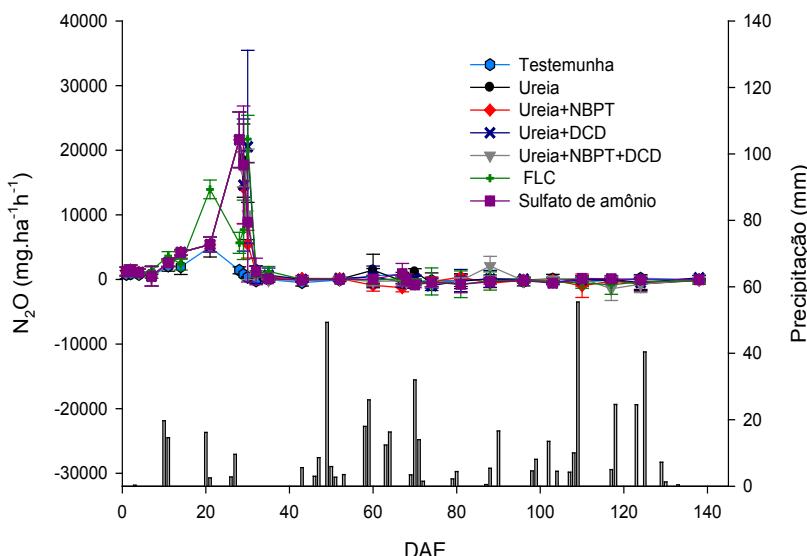


Figura 4. Fluxo de óxido nitroso (N_2O) e precipitação pluviométrica em cultivo de arroz irrigado em função do fertilizante nitrogenado. Barras verticais representam o desvio padrão da média. Embrapa ClimaTemperado, Capão do Leão, RS, safra 2016/2017.

As emissões totais de N_2O em cultivo de arroz irrigado foram: $1,45 \pm 0,89 \text{ kg N}_2O \text{ ha}^{-1}$, para a testemunha com omissão da adubação nitrogenada; $4,73 \pm 0,74 \text{ kg N}_2O \text{ ha}^{-1}$, para a ureia; $3,77 \pm 1,00 \text{ kg N}_2O \text{ ha}^{-1}$, para a ureia/NBPT; $4,86 \pm 1,42 \text{ kg N}_2O \text{ ha}^{-1}$, para a ureia/DCD; $4,36 \pm 0,16 \text{ kg N}_2O \text{ ha}^{-1}$ para a ureia/NBPT+DCD; $4,22 \pm 1,02 \text{ kg N}_2O \text{ ha}^{-1}$, para o FLC; e $4,36 \pm 0,92 \text{ kg N}_2O \text{ ha}^{-1}$, para o sulfato de amônio (Figura 5). Ainda que relativamente baixos, os fluxos totais de N_2O determinados no presente estudo foram superiores aos medidos por

Wesz (2012) ($-0,1 \pm 0,05 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$), Buss (2012) ($0,22 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$) e Veçozzi et al. (2016) ($0,44 \text{ a } 2,09 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$), em estudos realizados no mesmo solo.

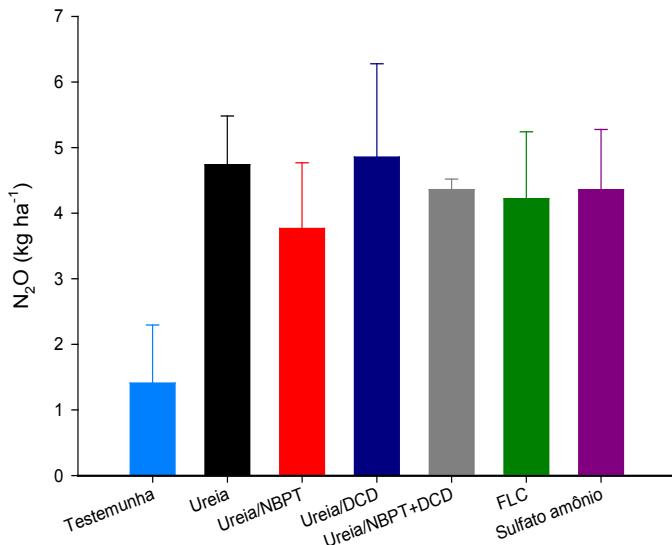


Figura 5. Emissão total de óxido nitroso (N_2O) em cultivo de arroz irrigado em função do fertilizante nitrogenado. Barras verticais representam o desvio padrão da média. Embrapa ClimaTemperado, Capão do Leão, R, safra 2016/2017.

As fontes de N avaliadas não diferiram entre si quanto às emissões totais de N_2O (Tabela 5). Os resultados obtidos confirmam observações de Hube et al. (2017), que não verificaram diferença no uso de ureia com inibidores de urease e nitrificação sobre as emissões de N_2O em cultivo de aveia, comparativamente à ureia comum. Assim como no presente estudo, os resultados obtidos por Zanatta (2009) mostraram semelhança nas emissões de N_2O derivadas de sulfato de amônio e ureia. Por sua vez, Veçozzi et al. (2016), observaram emissões de N_2O semelhantes associadas ao uso de ureia e fertilizante

de liberação controlada em cultivo de arroz irrigado no Sul do Brasil, também corroborando os resultados do presente estudo.

Os resultados obtidos mostram que tanto a ureia, fonte convencional de nitrogênio para o arroz irrigado, quanto as demais fontes de N avaliadas, não intensificam o efluxo de N_2O do solo, quando manejadas de forma adequada, especialmente quando se adota o parcelamento da adubação em cobertura e utiliza-se a água de irrigação para incorporação do fertilizante nitrogenado ao solo.

O fator de emissão de N_2O , índice que considera o porcentual do fertilizante aplicado perdido na forma de N_2O , também não diferiu entre as fontes nitrogenadas testadas, visto que as emissões totais e dose de N foram semelhantes entre as fontes de N (Tabela 5). A despeito da semelhança entre as fontes nitrogenada, os fatores de emissão determinados são superiores ao valor de referência preconizado pelo IPCC (1997), que é de 1% do N aplicado ao solo. Atribui-se esse resultado às variações na condição de oxirredução do solo ocorridas no período inicial de desenvolvimento da cultura, favorecendo as emissões de N_2O e, consequentemente, elevando o fator de emissão das fontes de N. De acordo com Akiyama et al. (2005), que avaliaram os fatores de emissão de N_2O de numerosos estudos com a cultura de arroz sob diferentes regimes de irrigação, propuseram como fator de emissão médio $0,31 \pm 0,31\%$.

Tabela 5. Emissão total e fator de emissão de óxido nitroso (N_2O) de fertilizantes nitrogenados em cultivo de arroz irrigado. Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, Safra 2016/2017.

| Fonte de N ¹ | Emissão de N_2O kg ha ⁻¹ | Fator emissão N_2O |
|-------------------------|--|----------------------|
| | | % N aplicado |
| Testemunha | 1,409±0,886 | ---- |
| Ureia | 4,739±0,742 | 2,776±0,125 |
| Ureia/NBPT | 3,766±1,003 | 1,964±0,869 |
| Ureia/DCD | 4,856±1,422 | 2,873±1,911 |

| Fonte de N ¹ | Emissão de N ₂ O kg ha ⁻¹ | Fator emissão N ₂ O % N aplicado |
|-------------------------|--|--|
| Ureia/NBPT+DCD | 4,359±0,160 | 2,458±0,669 |
| FLC | 4,220±1,021 | 2,678±1,008 |
| Sulfato amônio | 4,357±0,920 | 2,456±1,226 |

¹Fontes de N: Ureia; Ureia/NBPT- ureia protegida com o inibidor de urease NBPT; Ureia/DCD- ureia protegida com o inibidor de nitrificação DCD; Ureia/NBPT+DCD- ureia protegida com os inibidores NBPT e DCD; FLC- fertilizante de liberação controlada; e Sulfato de amônio.

²DAF: dias após a aplicação do fertilizante nitrogenado.

Conclusões

As fontes e manejo da adubação nitrogenada não interferem nos fluxos de N do solo em cultivo de arroz irrigado desenvolvido na região subtropical do Brasil.

A emissão de N₂O é a principal via de perda de nitrogênio do sistema solo-planta, variando de 1,96%, para a ureia/NBPT, a 2,87%, para a ureia/DCD, superando o valor de referência de 1% proposto pelo IPCC.

A volatilização de NH₃ é uma fonte de perda de N de menor importância para o arroz irrigado, predominando em aplicações realizadas nos estádios iniciais de desenvolvimento da planta de arroz. O sulfato de amônio apresenta menor fator de emissão de NH₃ (0,94%) que as fontes contendo ureia, variando de 1,21%, para a ureia/NBPT a 2,04%, para a ureia/DCD. Independentemente da fonte e manejo do N, os fatores de emissão de NH₃ no cultivo de arroz irrigado foram bem menores que o valor de referência proposto pelo IPCC, de 10%.

Referências

- AKIYAMA, H.; YAGI, K.; YAN, X. Direct N₂O emissions from rice paddy fields: summary of available data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 19, 2005. GB1005, doi:10.1029/2004GB002378.
- ALVES, B. J. R. Emissões de óxido nitroso de solos agrícolas e de manejo de manejo de dejetos. In: BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência - Setor Agropecuária**. Brasília, DF, 2015. 98 p.
- ANDA (Associação Nacional para Difusão de Adubos). **Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/index.php?mpg=03.01.00&ver=por>>. Acesso em: 10 set. 2013.
- ANEJA, V. P.; BLUNDEN, J.; JAMES, K.; SCHLESINGER, W. H.; KNIGHTON, R.; GILLIAM, W.; JENNINGS, G.; NIYOGI, D.; COLE, S. Ammonia assessment from agriculture: U.S. status and needs. **Journal of Environmental Quality**, v. 37, n. 2, p. 515-520, 2008.

Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado Influenciados pelo Manejo da Adubação Nitrogenada

ANEJA, V. P.; NELSON, D.; ROELLE, P.; WALKER, J. Agricultural ammonia emissions and ammonium concentrations associated with aerosols and precipitation in the southeast United States. **Journal of Geophysical Research**, v. 108(D4), 4152, p. 12 (1-11), 2003. doi:10.1029/2002JD002271, D4.

ANJOS, J. T.; TEDESCO, M. J. Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados aplicados em solos cultivados. **Científica**, v. 4, p. 49-55, 1976.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. v. 3, 336 p.

BUSS, G. L. **Emissões de metano e óxido nitroso em cultivo de arroz irrigado por aspersão, alagamento contínuo e intermitente**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 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 fertilizers and water management, **Plant Soil**, v. 196, p. 7-14, 1997.

CANTARELLA, H.; MATTOS, D.; QUAGGIO, J. A.; RIGOLIN, A. T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 67, p. 215-223, 2003.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 551-594.

CASSMAN, K. G.; PENG, S.; OLK, D.C.; LADHA, J. K.; REICHARDT, W.; DOBERMANN, A.; SINGH, U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. **Field Crops Research**, v. 56, p. 7-39, 1998.

CHAPUIS-LARDY, E.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J. L.; BERNOUX, M. Soils, a sink for N_2O ? A review. **Global Change Biology**, v. 13, p.1-17, 2007.

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

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.

CUNHA, N. G. da; COSTA, F. A. da. Solos da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. 6 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 152).

FILLERY, I. R. P.; SIMPSON, J. R.; DE DATTA, S. K. Influence of field environment and fertilizer management on ammonia loss from flooded rice. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 914-920, 1984.

Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado Influenciados pelo Manejo da Adubação Nitrogenada

FITTS, P. W.; WALKER, T. W.; KRUTZ, L. J.; GOLDEN, B. R.; VARCO, J. J.; GORE, J.; CORBIN, J. L.; SLATON, N. A. Nitrification and yield for delayed-flood rice as affected by a nitrification inhibitor and coated urea. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 5, p. 1541-1548, 2014.

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, p. 36-44, 2009.

HUBE, S.; ALFARO, M. A.; SCHEER, C.; BRUNK, C.; RAMÍREZ, L.; ROWLINGS, D.; GRACE, P. Effect of nitrification and urease inhibitors on nitrous oxide and methane emissions from an oat crop in a volcanic ash soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 238, p. 46-55, 2017.

HOU, A. X.; CHEN, G. X.; WANG, Z. P.; VAN CLEEMPUT, O.; PATRICK JR., W. H. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 2180-2186, 2000.

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, p. 83-91, 2007.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). UNEP (United Nations Environment Programme). OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development). IEA (International Energy Agency). **Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (NGGIP)**. Paris, 1997. 3 v. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>>.

JANTALIA, C. P.; HALVORSON, A. D.; FOLLETT, R. F.; ALVES, B. J. R.;
POLIDORO, J. C.; URQUIAGA, S. Nitrogen source effects on ammonia
volatilization as measured with semi-static chambers. **Agronomy
Journal**, v. 104, n. 6, p. 1595-1603, 2012.

LIU, S.; QIN, Y.; ZOU, J.; LIU, Q. Effects of water regime during rice-
growing season on annual direct N_2O emission in a paddy rice-
winter wheat rotation system in southeast China. **Science of the Total
Environment**, v. 408, p. 906-913, 2010.

MA, B. L.; WU, T. Y.; TREMBLAY, N.; DEEN, W.; MCLAUGHLIN, N. B.;
MORRISON, M. J.; STEWART, G. On-farm assessment of the amount
and timing of nitrogen fertilizer on ammonia volatilization. **Agronomy
Journal**, v. 102, p. 134-144, 2010.

MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; SILVEIRA, P. M.; CARVALHO, M.
C. S.; SILVA, M. A. S.; BERNARDES, T. G.; COSTA, A. R.; MACHADO,
P. L. O. A. Perdas de nitrogênio via emissão de óxido nitroso (N_2O) e
volatilização de amônia (NH_3) no feijoeiro irrigado. In: CONGRESSO
NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 10., 2011, Goiânia. **Anais...**
Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2011. 1 CD-ROM.

MISSELBROOK, T. H.; VAN DER WEERDEN, T. J.; PAIN, B. F.; JARVIS,
S. C.; CHAMBERS, B. J.; SMITH, K. A.; PHILLIPS, V. R.; DEMMERS,
T. G. M. Ammonia emission factors for UK agriculture. **Atmospheric
Environment**, v. 34, p. 871-880, 2000.

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

Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado Influenciados pelo Manejo da Adubação Nitrogenada

NELSON, D. W.; HUBER, D. **Nitrification inhibitors for corn production.** Ames: Cooperative Extension Service, Iowa State University of Science and Technology, 1992. 6 p. Disponível em: <<http://corn.agronomy.wisc.edu/Management/pdfs/NCH55.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2017.

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

NORMAN, R. J.; WILSON JR., C. E.; SLATON, N. A. Soil fertilization and mineral nutrition in U.S. mechanized rice culture. In: SMITH, C. W.; DILDAY, R. H. (Ed.). **Rice: origin, history, technology, and production.** Hoboken: John Wiley, 2003. p. 331-411.

NORMAN, R. J.; WILSON JR., C. E.; SLATON, N. A.; BOOTHE, D. L.; GRIGGS, B. R. **Influence of nitrogen fertilizer source, application rate and timing on grain yields of delayed, flood rice.** Atlanta: Potash and Phosphate Institute, 2002. 5 p.

PHONGPAN, S.; FRENEY, J. R.; KEERTHISINGHE, D. G.; CHAIWANAKUPT, P. Use of phenylphosphorodiamidate and N-(n-butyl) thiophosphorictriamide to reduce ammonia loss and increase grain yield following application of urea to flooded rice. **Fertilizer Research**, v. 41, p. 59-66, 1995.

RAFIQUE, R.; HENNESSY, D.; KIELY, G. Nitrous oxide emission from grazed grassland under different management systems. **Ecosystems**, v. 14, p. 563-582, 2011.

SCHLESINGER, W. H. An estimate of the global sink for nitrous oxide in soils. **Global Change Biology**, v. 19, p. 2929-2931, 2013.

SCIVITTARO, W. B.; GONÇALVES, D. R. N.; VALE, M. L. C.; RICORDI, V. G. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do

arroz irrigado à aplicação de uréia tratada com o inibidor de urease NBPT. **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, 2010, p. 1283-1289.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P.; CONANT, R. N_2O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 8, p. 1-9, 2013.

SKIBA, U.; SMITH, K. A. The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. **Chemosphere**, v. 2, p. 379-386, 2000.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO (SBCS). **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. [s. l.]: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Núcleo Regional Sul: Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. 376 p.

SOSBAI (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO). **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2016. 197 p.

VEÇOZZI, T. A.; SCIVITTARO, W. B.; SOUSA, R. O.; SILVEIRA, A. D.; JARDIM, T. M. **Emissões de gases de efeito estufa em cultivo de arroz irrigado: efeito do manejo da adubação nitrogenada**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, [2016]. 24 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento). No prelo.

VILLAS BÔAS, R. L. **Recuperação do nitrogênio da uréia pelo milho: efeito da mistura com sulfato de amônio, da dose e do modo de aplicação**. 1995. 128 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências - Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

VLEK, P. L. G.; STUMPE, J. M.; BYRNES, B. H. Urease activity and inhibition in flooded systems. **Fertilizer Research**, v. 1, p. 191-202, 1980.

Fluxos de Amônia e Óxido Nitroso em Cultivo de Arroz Irrigado Influenciados pelo Manejo da Adubação Nitrogenada

WESZ, J. Mitigação das emissões de metano e óxido nitroso em Planossolo pela adequação do manejo da água em cultivo de arroz irrigado. 2012. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

XU, J. G.; HEERAMAN, D. A.; WANG, Y. Fertilizer and temperature effects on urea hydrolysis in undisturbed soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 16, p. 63-65, 1993.

ZANATTA, J. A. Emissão de óxido nitroso afetada por sistemas de manejo do solo e fontes de nitrogênio. 2009. 79 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

