

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE PERDAS DE NITROGÊNIO COM O USO
DE FERTILIZANTES ESTABILIZADOS EM MILHO NO SUL DO BRASIL**

**Adriana Cancian
(Dissertação)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE PERDAS DE NITROGÊNIO COM O USO
DE FERTILIZANTES ESTABILIZADOS EM MILHO NO SUL DO BRASIL**

ADRIANA CANCIAN
Engenheira Agrônoma (UFSM)

Dissertação apresentada como um
dos requisitos à obtenção do Grau
de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS)
Maio 2018

Cancian, Adriana
POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE PERDAS DE NITROGÊNIO
COM O USO DE FERTILIZANTES ESTABILIZADOS EM MILHO NO
SUL DO BRASIL / Adriana Cancian. -- 2018.

61 f.

Orientador: Cimélio Bayer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-
RS, 2018.

1. Adubação nitrogenada. 2. Uso de inibidores da
urease e nitrificação. 3. Eficiência da adubação
nitrogenada. 4. Rendimento da cultura do Milho. I.
Bayer, Cimélio, orient. II. Título.

ADRIANA CANCIAN
Engenheira Agrônoma - UFSM

DISSERTAÇÃO

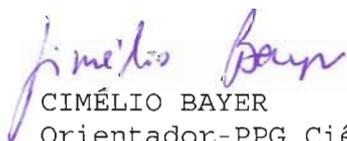
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

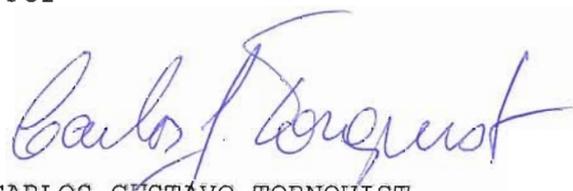
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 11.05.2018
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 02.07.2019
Por



CIMÉLIO BAYER
Orientador-PPG Ciência do Solo



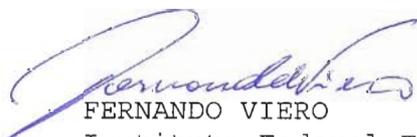
CARLOS GUSTAVO TORNQUIST
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo



TALES TIECHER
Departamento de Solos/UFRGS



PAULO RÉGIS FERREIRA DA SILVA
PPG Fitotecnia/UFRGS



FERNANDO VIERO
Instituto Federal Farroupilha



CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

*À Luiz Francisco Finamor (in memoriam),
pela amizade e incentivo.*

Dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por mais esta etapa de aprendizado, pela proteção e amor.

Ao Professor Cimélio Bayer pela orientação e confiança depositada em mim neste trabalho.

Ao amigo e Pós-Doc. Fernando Viero pela valorosa ajuda na realização deste trabalho, desde as coletas de campo e ensinamentos repassados.

Ao grupo de pesquisa do Professor Paulo Regis Ferreira da Silva pela condução do experimento de campo e disponibilização dos resultados relacionados à cultura do milho em Eldorado do Sul.

A pesquisadora Sandra Mara Vieira Fontoura e aos funcionários da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária pela condução e coletas realizadas no experimento de Guarapuava e disponibilização dos dados deste local.

Ao pesquisador Anderson Santi pela parceria no experimento em Passo Fundo e aos funcionários da Embrapa Trigo pela realização das coletas neste local.

Aos amigos do grupo de pesquisa CIMBA: Diego, Caroline, Cristhian, Lucas, Mário, em especial aos amigos da “salinha do Murilo” (Murilo, Anaí, Magno, Osmar, Vítor e Julia), pela amizade, pela troca de conhecimentos e companheirismo de toda hora, principalmente na hora do mate e das bolachas/bolos compartilhados.

Ao técnico de laboratório e amigo Luiz Antônio da Silveira (Tonho) por toda ajuda prestada nestes dois anos de mestrado.

Aos bolsistas de iniciação científica: Fernanda, Daniela, Henrique e Dudu por toda ajuda e principalmente por todas as destilações de nitrogênio realizadas. Às amigas e parceiras de todas as horas Andressa, Ana Paula e Juscilaine.

Ao meu amigo Cledimar Rogério Lourenzi que sempre me apoiou em seguir na Pós-graduação e que sempre acreditou mais em mim do que eu mesma.

À UFRGS pelo ensino gratuito e de qualidade e ao CNPq pela concessão da bolsa. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos conhecimentos repassados e ao Técnico Adão e o secretário Jader pelos auxílios providenciais.

À minha família, fonte de apoio e amor, em especial aos meus Pais Ivanir e Ana, meus irmãos Jú e Fe, meu cunhado Sidi, também ao Nilto, Labélis, Dudu, Sérgio, Ediane, Xandi e Tere. Aos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho...

...meu sincero agradecimento.

POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE PERDAS DE NITROGÊNIO COM O USO DEFERTILIZANETS ESTABILIZADOS EM MILHO NO SUL DO BRASIL¹

Autor: Adriana Cancian
Orientador: Cimélio Bayer

RESUMO

Um dos principais desafios agronômicos atuais é o aumento da eficiência do N aplicado na cultura do milho, cuja ureia é o principal fertilizante utilizado e a volatilização de amônia (NH_3) é uma das principais formas de perda de N. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficiência da aplicação de inibidores de urease e/ou de nitrificação à ureia (U) na mitigação das perdas de N-NH_3 por volatilização, na eficiência agronômica da adubação nitrogenada e no rendimento do milho na região Sul do Brasil. No Estudo 1, experimentos foram conduzidos no sistema plantio direto (SPD), na safra 2016/17, em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava, nos quais foram avaliadas as seguintes fontes de N: (i) ureia comum (U), (ii) U+inibidor de urease (NBPT), além de um tratamento controle sem aplicação de N (iii). No estudo 2, um experimento foi conduzido em Eldorado do Sul, nas safras 2015/16 e 2016/17, no qual foram avaliados as seguintes fontes de N: (i) U, (ii) U+NBPT, (iii) U+DCD, (iv) U+NBPT+DCD, além de um tratamento controle sem aplicação de N (v). Visando avaliar o efeito das fontes de N na amonificação (NH_4^+), nitrificação (NO_3^-) e no pH do solo, conduziu-se um estudo de incubação em laboratório, onde foi aplicada uma dose de N equivalente a 400 kg ha^{-1} de N aos respectivos solos coletados das áreas experimentais dos diferentes locais e utilizando as mesmas fontes de N utilizadas nos estudos 1 e 2. Em ambos os estudos de campo, o inibidor de urease NBPT foi eficiente na redução da volatilização de N-NH_3 em 50-85% em relação à ureia comum, a qual foi variável com o tipo de solo e condições climáticas no período de avaliação. A eficiência do NBPT a campo foi confirmada no estudo de incubação pela redução dos teores de NH_4^+ no segundo dia de incubação de $217\text{-}224 \text{ mg kg}^{-1}$ de N- NH_4^+ com a aplicação de ureia comum para $72\text{-}109 \text{ mg kg}^{-1}$ de N- NH_4^+ no tratamento U+NBPT, além dos menores incrementos do pH do solo. Por sua vez, os resultados dos experimentos de campo (rendimento de milho) e o experimento de laboratório (teor de NO_3^-) sugerem que o DCD não foi eficiente na diminuição das taxas de nitrificação e no aumento da eficiência do fertilizante.

Palavras-chave: inibidores da urease, volatilização do N, NBPT, DCD.

¹Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (62p) Maio, 2018.

POTENTIAL OF MITIGATION OF N LOSSES WITH STABILIZED FERTILIZERS IN MAIZE IN SOUTHERN BRAZIL¹

Author: Adriana Cancian

Adviser: Cimélio Bayer

ABSTRACT

One of the main current agronomic challenges is improve in efficiency of N applied on maize crop, and urea (U) is the main N fertilizer used and volatilization of ammonia (NH₃) is one of the main forms of loss of N. The aim of this study were evaluate the efficiency of urease inhibitors (NBPT) and/or nitrification (DCD) on mitigate U losses through ammonia (NH₃) volatilization and on the agronomic efficiency of N fertilization and maize yield in Southern Brazil. In study 1, experiments were conducted in no-till system, during the 2016/17 agricultural crop, located at Eldorado do Sul, Passo Fundo and Guarapuava, where the following N sources were evaluated: (i) U, (ii) U + urease inhibitor (NBPT), and (iii) the control treatment without application of N. In study 2, the experiment was conducted in Eldorado do Sul, during the 2015/16 and 2016/17 agricultural crop, where the following N sources were evaluated: (i) U, (ii) U + NBPT, (iii) U + DCD, (iv) U + NBPT + DCD, besides the control treatment without application of N (v). In order to evaluate the effect of N sources on ammonification (NH₄⁺), nitrification (NO₃⁻) and soil pH, a laboratory incubation study was conducted, where a rate of equivalent application to N to 400 kg ha⁻¹ to the respective soils collected from the experimental areas of the different sites and using the same N sources used in studies 1 and 2. In both field studies, the NBPT urease inhibitor was efficient in reducing N-NH₃ volatilization by 50-85% relative to U, that was dependent on soil type and climatic conditions during the evaluation period. The efficiency of NBPT observed in the field studies was confirmed by the incubation study due to reducing NH₄⁺ contents on the second day of incubation from 217-224 mg kg⁻¹ N-NH₄⁺ under common urea application to 72-109 mg kg⁻¹ of N-NH₄⁺ under U + NBPT treatment, in addition to reducing the soil pH. The data of field experiment (maize yield and volatilization losses) and the laboratory experiments (content of NO₃⁻) suggest that DCD inhibitor was not efficient in reduce nitrification rates and favor the improvement in fertilizer efficiency.

Keywords: urease inhibitors, N volatilization, NBPT, DCD.

¹ M.Sc. Dissertation in Soil Science – Graduate Program in Soil Science. Faculty of Agronomy. Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (62p) May, 2018.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Fertilizantes Nitrogenados.....	4
2.2 Perdas de Nitrogênio.....	7
3 HIPÓTESES.....	10
4 OBJETIVO GERAL.....	11
5 ESTUDO I – MITIGAÇÃO DAS PERDAS DE N POR VOLATILIZAÇÃO PELA ADIÇÃO DE INIBIDOR DA UREASE À UREIA NA CULTURA DO MILHO EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL	12
5.1 Introdução	13
5.2 Material e Métodos.....	14
5.2.1 Tratamentos e delineamento experimental.....	15
5.2.2 Condução dos experimentos	17
5.2.3 Dados meteorológicos	17
5.2.4 Quantificação das perdas de N por volatilização de amônia ...	17
5.2.5 Estudo de incubação em laboratório.....	19
5.2.6 Análise estatística.....	20
5.3 Resultados e Discussão.....	21
5.3.1 Condições meteorológicas.....	21
5.3.2 Taxa diária de volatilização de amônia.....	23
5.3.3 Perda acumulada de N por volatilização de amônia.....	24
5.3.4 Estudo de incubação em laboratório.....	26
5.4 Conclusões.....	30
6. ESTUDO 2 – VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS ESTABILIZADOS NA CULTURA DO MILHO EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL	31

6.1 Introdução	32
6.2 Material e Métodos	34
6.2.1 Experimento a campo	34
6.2.2 Volatilização de amônia	35
6.2.3 Estudo de incubação em laboratório.....	37
6.2.4 Rendimento de grãos e eficiência agronômica de uso do N....	38
6.2.5 Análise estatística	38
6.3 Resultados e Discussão	38
6.3.1 Condições meteorológicas e umidade do solo.....	38
6.3.2. Taxa de volatilização diária.....	40
6.3.3 Perdas acumuladas de N-NH ₃	43
6.3.4 Eficiência dos inibidores de urease e de nitrificação	47
6.3.5 Rendimento de grãos.....	51
6.3.6 Eficiência agronômica de uso do N (EAN).....	52
6.4 Conclusões.....	54
REFERÊNCIAS.....	55

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Síntese de informações referentes aos locais e experimentos conduzidos em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava, na safra 2016/17.....	16
Tabela 2. Intensidade do íon amônio ($\text{mg kg}^{-1}\text{d}^{-1}$) durante os 29 dias incubação nos solos de Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava	28
Tabela 3. Perda acumulada de N por volatilização de amônia (% do N aplicado em cobertura), nas diferentes fontes e doses.....	44
Tabela 4. Intensidade do íon amônio e nitrato ($\text{mg kg}^{-1}\text{d}^{-1}$) durante os 29 dias de incubação do solo de Eldorado do Sul	51
Tabela 5. Rendimento de grãos de milho em função de fontes e doses de N, em dois anos agrícolas, em Eldorado do Sul, RS	52
Tabela 6. Eficiência agrônômica de uso do N ($\text{kg grãos /kg N aplicado}$) na cultura do milho, em dois anos agrícolas (Eldorado do Sul, RS).....	53

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema da classificação dos fertilizantes nitrogenados	5
Figura 2. Mapa da Região Sul, Guarapuava (1) no estado do Paraná e Passo Fundo (2) e Eldorado do Sul (3) no estado do Rio Grande do Sul.....	15
Figura 3. Coletor usado na quantificação das perdas de N por volatilização de amônia (A) e as bases subsequentes para que o solo no interior do anel PVC ficasse exposto às condições ambientais (B).....	19
Figura 4. Precipitação, temperatura máxima, mínima e média durante o período de avaliação em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava, na safra de verão 2016/17	22
Figura 5. Taxa diária (a, b, c) e perda acumulada (d, e, f) de N por volatilização de amônia em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava, na safra de verão 2016/2017.....	25
Figura 6. Variação do pH (a, b, c) e teores de amônio (d, e, f) no solo sob aplicação de uma dose equivalente a 400 kg ha ⁻¹ de N na forma de ureia comum e de ureia + inibidor da urease (NBPT) no Argissolo de Eldorado do Sul e nos Latossolos de Passo Fundo e de Guarapuava ao longo de 29 dias de incubação. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos segundo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), exceto pH.....	29
Figura 7. Temperatura do ar, precipitação pluviométrica e umidade do solo no período de coletas, nas safras 2015/16 (a e b) e 2016/17 (c e d).....	40
Figura 8. Taxa de volatilização diária em kg ha ⁻¹ d ⁻¹ de N, nas diferentes fontes e diferentes doses, na safra 2015/2016 (a, b, c) e safra 2016/2017 (d, e, f).....	42
Figura 9. Perda acumulada em porcentagem do N aplicado, na safra 2015 /2016 (a, b, c) e safra 2016/2017 (d, e, f). Barras verticais indicam o erro padrão das amostras.....	45
Figura 10. Variação do pH em função da aplicação de ureia e ureia com inibidor de urease no solo vermelho	49

1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho está entre os principais cereais produzidos no Brasil, com posição de destaque do ponto de vista social e econômico. Em 2016/2017, a área plantada de milho foi de 17,6 Mha, produzindo 97,8 milhões de toneladas de grãos. Na região Sul do Brasil a área de milho é de aproximadamente 4 Mha, com rendimentos médios de lavoura de $6,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (CONAB, 2018).

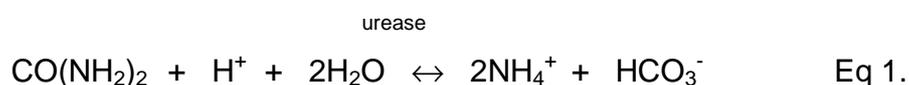
A cultura do milho necessita de condições edafoclimáticas favoráveis para expressar seu potencial produtivo, além do adequado controle fitossanitário e de ervas daninhas, e da fertilidade do solo. Dentre os nutrientes essenciais, o N é bastante influenciado pelas condições ambientais e pelas práticas de manejo, e é exigido em grande quantidade pela cultura do milho. A adubação nitrogenada apresenta uma eficiência média de 50 % do N aplicado, ou seja, apenas 50 % do N aplicado é absorvido pela cultura (Lara Cabezas et al., 2000). Essa baixa eficiência do N aplicado é atribuída aos diversos processos de perda que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, sendo o N sujeito à lixiviação, volatilização, desnitrificação e imobilização microbiana.

Nesse sentido, a aplicação de fertilizantes nitrogenados estabilizados, que contêm inibidores de urease, por exemplo, e que resultem numa redução das taxas de amonificação, podem apresentar menores perdas de amônia (N-NH_3) por volatilização e, por consequência, podem resultar numa maior eficiência da adubação nitrogenada (Silva et al., 2011). Atualmente, também estão chegando ao mercado alguns fertilizantes com inibidores de nitrificação, associados ou não aos inibidores de urease, os quais visam reduzir as taxas de nitrificação e, conseqüentemente, as perdas de N por lixiviação e/ou desnitrificação.

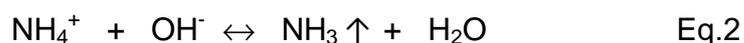
A eficiência desses fertilizantes em reduzir as perdas de N por volatilização, bem como a sua eficiência agronômica e o seu impacto no rendimento de grãos do milho, é bastante dependente das condições de solo e clima e das práticas de manejo, e a sua avaliação deve ser realizada regionalmente. Nesta pesquisa, foi avaliado o potencial do inibidor de urease NBPT ([N-(n-butil) tiofosfórico triamida]) em mitigar as perdas de N-NH₃ da ureia por volatilização em três locais da região Sul (Eldorado do Sul - RS, Passo Fundo - RS e Guarapuava - PR) (Estudo 1). Em Eldorado do Sul avaliou-se a eficiência da adição à ureia comum dos inibidores de urease NBPT e de nitrificação DCD (Dicianodiamida), isolados e associados, sobre as perdas de N-NH₃ por volatilização, eficiência agronômica do N aplicado e rendimento de grãos do milho (Estudo 2). Paralelo a esses dois estudos foi conduzido um ensaio de laboratório que visou confirmar o efeito dos inibidores de urease e de nitrificação na amonificação e nitrificação, respectivamente, a partir da avaliação dos teores de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ ao longo do período de incubação dos fertilizantes sem (ureia comum) e com os inibidores (ureia+NBPT, ureia+DCD).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ureia representa 56 % dos fertilizantes nitrogenados comercializados (IPNI, 2016) no Brasil, sendo o milho e a cana de açúcar as culturas que mais consomem fertilizantes nitrogenados, 27% e 21% do total, respectivamente (Heffer et al., 2017). A hidrólise da ureia no solo é diretamente dependente da atividade da enzima urease, que é comum na natureza e está presente em microrganismos, plantas e animais (Paulson & Kurtz, 1969). Na presença da enzima urease e água, a ureia hidrolisa de acordo com a Equação 1 (Kissel et al., 1988):



Após a hidrólise da ureia no solo, o N-NH_4^+ pode ser absorvido pelas plantas, imobilizado pela microbiota, adsorvido no solo, nitrificado ou volatilizado na forma de amônia (NH_3) de acordo com a Equação 2. A reação de formação de amônia é favorecida pelo aumento do pH que ocorre ao redor dos grânulos de ureia (equação 1) devido ao consumo de íons H^+ e formação de íons OH^- ($\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^-$) (Vitti et al., 2002).



2.1 Fertilizantes Nitrogenados

Na década de 1990 as duas primeiras moléculas utilizadas no mundo com a função de estabilizar o N e comercializadas como aditivos foram o DMPP (3,4-dimetilpirazolfosfato) e o NBPT [N-(n-butil) tiofosfórico triamida], as quais tinham como função a inibição da reação de nitrificação e da atividade da urease no solo, respectivamente. Em 1924 surgiram os primeiros estudos com fertilizantes nitrogenados quimicamente modificados ou de liberação lenta, estavam aparecendo o ciclo diureia (CDU) e a ureia formaldeído (UF), que foram patenteadas como fertilizantes na Europa e nos EUA em 1947 e 1955, respectivamente, e ainda despertam grande interesse da pesquisa no mundo (Yamamoto et al., 2016). Em 1960, a ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) foi patenteada pelo Tennessee Valley Authority (TVA) (Blouin & Rindt, 1967) que, posteriormente, abriu caminho para o aparecimento de uma série de inovações tecnológicas relacionadas à produção de fertilizantes de liberação controlada (Guelfi, 2017).

Os fertilizantes que promovem melhorias na eficiência agrônômica da adubação nitrogenada são denominados fertilizantes de eficiência aumentada (Trenkel, 2010; Timilsena et al., 2014) e podem ser classificados em três categorias, conforme as tecnologias utilizadas nos seus processos de produção: (i) estabilizados; (ii) de liberação lenta e (iii) de liberação controlada (Guelfi, 2017, Figura 1).

É importante enfatizar que existem diferenças conceituais entre as tecnologias quando são utilizados os termos “liberação lenta” e “liberação controlada”. A primeira delas é que os fertilizantes de liberação lenta não têm revestimento, como os fertilizantes de liberação controlada, também ocorrem diferenças nos preços pois, geralmente, os fertilizantes de liberação controlada são mais caros em função do tipo e quantidade de revestimento utilizado no processo de produção (Naz e Sulaiman, 2016).

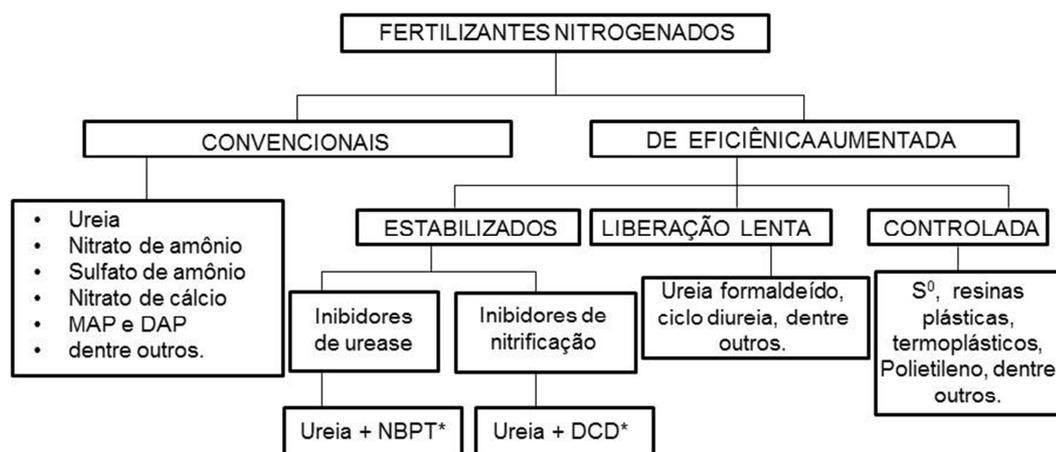


Figura 1. Esquema da classificação dos fertilizantes nitrogenados (Guelfi, 2017).
*NBPT: N-(n-butil) tiofosfórico triamida, DCD: Dicianodiamida.

Os principais inibidores de urease são: NBPT, hidroquinona, cobre, boro e catecol. Entre os inibidores de nitrificação estão o DMPP, DCD, tiosulfato de amônio e o nitrapyrin. Podemos dizer que os inibidores de urease são compostos químicos que são adicionados à ureia em pequenas quantidades, com o objetivo de estabilizar o N. É uma das tecnologias mais eficientes para aumentar sua eficiência e tem baixo custo (Trenkel, 2010; Azeem et al., 2014; Timilsena et al., 2014).

O inibidor de urease mais utilizado em produtos comerciais é o NBPT. Para adição à ureia, o NBPT é dissolvido em um solvente não aquoso (em geral propilenoglicol) acrescido de corantes que ajudam na observação visual da distribuição do aditivo no fertilizante. A manutenção da qualidade do produto depende das condições no local de armazenamento. À temperatura de 25 °C, o tempo de meia vida do NBPT é de 74 dias (Watson et al., 2008).

Os inibidores da nitrificação são aditivos que atrasam a oxidação biológica do NH_4^+ a NO_3^- no solo devido à diminuição da atividade das bactérias *Nitrosomonas*, responsáveis pela conversão do amônio a nitrito (NO_2^-), primeira etapa da reação de nitrificação (Abalos et al., 2014). Porém, a manutenção do N por mais tempo na forma amoniacal, devido à adição de inibidores de nitrificação à ureia, pode ocasionar maiores perdas de N por volatilização de amônia do que

as da ureia comum (Prakasa Rao; Puttanna, 1987; Trenkel, 2010), já que na forma amoniacal o N pode ser rapidamente convertido em amônia. Esse é um fato ainda mais preocupante quando a aplicação da ureia com inibidores de nitrificação é realizada em condições favoráveis à ocorrência de volatilização de amônia. Em cultivo de milho fertilizado com ureia tratada com inibidor de nitrificação (DMPP), a perda de N por volatilização foi de 52 % do N aplicado, bem superior aos 39% do N aplicado verificado para a ureia comum (Silva, 2016).

Os inibidores de nitrificação são particularmente úteis em condições favoráveis à ocorrência de lixiviação de nitrato e desnitrificação. Essas perdas de N podem causar contaminação do lençol freático e contribuir para as emissões de óxido nitroso, um dos principais gases causadores do efeito estufa (Ruser; Schulz, 2015). Os inibidores de nitrificação possuem algumas situações específicas para sua aplicação, que seriam em áreas irrigadas, em solos arenosos localizados em regiões com maior intensidade de chuvas e com elevadas doses de N aplicadas anualmente (Guelfi, 2017).

Existe também, uma mistura física das diferentes tecnologias para fertilizantes nitrogenados chamados de “*blends*”. É uma alternativa para redução de custos dos fertilizantes de eficiência aumentada e uma possibilidade de ajuste da curva de liberação de N para cada tipo de cultivo. Por exemplo, a mistura física de grânulos de ureia tratada com NBPT e de ureia revestida com S^0 + polímeros é um tipo de *blend*. A fração de ureia tratada com NBPT é solúvel, menos suscetível às perdas e atende à demanda imediata de N pela cultura. A outra fração, de ureia + S^0 + polímeros, libera o N gradualmente em médio e longo prazo.

De modo geral, os custos dos fertilizantes nitrogenados convencionais e de eficiência aumentada variam em função das matérias-primas, tecnologias de produção e distância do mercado consumidor. Os preços seguem a seguinte tendência crescente: convencionais < estabilizados < *blends* ≤ liberação lenta < liberação controlada. O custo da ureia com inibidor de urease, que é um

fertilizante estabilizado, atualmente é até 10% maior do que a ureia comum sem aditivos (Guelfi, 2017).

2.2 Perdas de Nitrogênio

A ureia, dependendo das condições de solo e clima, pode apresentar expressivas perdas de N, principalmente por volatilização de amônia. Após a solubilização do fertilizante em solo úmido, ocorre um aumento do pH ao redor dos grânulos de ureia, o que leva a uma transformação do amônio (NH_4^+) em amônia (NH_3), que é perdida por volatilização (Holcomb III et al., 2011). Em solos mais argilosos, o maior poder de tamponamento do pH contribui para menores perdas de N da ureia por volatilização de NH_3 , bem como em solos em que o teor de umidade maior permite uma difusão do NH_4^+ proveniente da ureia para regiões do solo menos influenciadas pela reação alcalina da ureia no solo (Rodrigues & Kiehl, 1986).

Outra forma em que o N da ureia também pode ser perdido é pelas reações de nitrificação e desnitrificação. A nitrificação ocorre em solo aerado e é realizada por bactérias nitrificadoras que oxidam o NH_4^+ a nitrato (NO_3^-). O NO_3^- pode ser facilmente lixiviado no perfil do solo. Já, a desnitrificação é a perda de N na forma de nitrogênio elementar (N_2), óxido nítrico (NO) e óxido nitroso (N_2O) e ocorre mediante a ação de bactérias desnitrificantes. É um processo de redução do NO_3^- que ocorre em condições anóxicas (ausência de oxigênio), sendo, portanto, um processo comum de ocorrência em áreas alagadas e/ou compactadas.

Sangoi et al., (2003) comparando a lixiviação de N em dois solos distintos, verificou que a quantidade de nitrogênio lixiviada onde não foi aplicado N foi aproximadamente quatro vezes maior num Nitossolo Vermelho (520 g kg^{-1} de argila) do que num Neossolo Quartzarênico (50 g kg^{-1} de argila). Isto demonstra a grande capacidade dos solos argilosos, principalmente aqueles com alto teor de carbono, em disponibilizar N para a solução do solo. Além disso, o manejo da adubação nitrogenada e da palha, testados por estes autores, não influenciou a

quantidade total de N remanescente no solo arenoso, cujos valores finais foram muito menores que os do solo argiloso. Isto provavelmente ocorreu devido à grande lixiviação de NH_4^+ , estimulada pela baixa CTC. Assim, a maior parte do N permaneceu na solução do solo, sendo carregada pelos fluxos de água.

Na região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, perdas de NH_3 por volatilização variando de 25–45 % do N aplicado na forma de ureia têm sido verificadas nas culturas do milho, milho safrinha e cana-de-açúcar (Cantarella et al., 2008; Pereira et al., 2009; Zavaschi et al., 2014). Por sua vez, no Sul do Brasil, valores médios de perda de 20 % do N aplicado na forma de ureia têm sido observados nas culturas de arroz e milho, variando em função da umidade do solo, tipo de solo, e temperatura do ar, dentre outros fatores (Scivittaro et al., 2010; Rojas et al., 2012; Viero et al., 2017). Apesar de não serem perdas tão elevadas quanto valores de mais de 50 % do N aplicado verificadas por Lara Cabezas et al., (2000), as perdas de aproximadamente 20 % de N aplicado na forma de ureia são bastante expressivas do ponto de vista agrônomo e econômico quando se leva em consideração o alto custo do fertilizante nitrogenado, aproximadamente metade do custo de adubação na cultura do milho (Epagri, 2017).

Nas condições de temperatura ambiente de 35°C e aplicação da ureia sobre a superfície do solo, a perda máxima de amônia que pode ser atingida é 50% do N aplicado de acordo com Tasca et al. (2011). No trabalho de Viero et al., (2014), as perdas de N por volatilização da amônia na safra de inverno e com a cultura do trigo, foram baixas, menores que 3 % do N aplicado. No verão em que foi conduzido o mesmo experimento, porém com a cultura do milho, as maiores perdas por volatilização foram em torno de 15 % do N aplicado.

Soares et al., 2012 em seu estudo de laboratório, com condições controladas (temperatura de 25 ± 3 °C e umidade do solo mantida a 60 % da capacidade de campo) e medindo volatilização, encontrou perdas de N-NH_3 da ureia comum que atingiram 28 % do total de N aplicado, enquanto as perdas da ureia + NBPT [N-(n-butil) tiofosfórico triamida] foram de apenas 6 %. Isso representa uma redução de 78 % nas perdas de NH_3 pela presença do inibidor

de urease. Em um segundo experimento, estes mesmos autores encontraram perdas de N-NH₃ da ureia comum ligeiramente maiores (37 % do N aplicado), enquanto que as perdas da ureia + NBPT foram de 17 % do N aplicado, o que corresponde a uma redução de 54 % em relação à ureia não tratada. A adição do inibidor de nitrificação (DCD, Dicianodiamida) à ureia aumentou a volatilização do NH₃ em 19 % quando comparada à ureia sem o inibidor da nitrificação, resultando em uma perda média de aproximadamente 38 % do N aplicado (Soares et al., 2012).

Em estudo com diferentes manejos de irrigação, Viero et al. (2017) verificaram redução nas perdas de NH₃ de 64 e 59 %, respectivamente, no tratamento com o solo seco (sem irrigação) e no tratamento com o solo irrigado antes da aplicação, com o uso do inibidor de urease em relação à ureia comum. Já no tratamento com a irrigação após a fertilização, o resultado encontrado foi uma redução substancial nas perdas de NH₃ por volatilização nas duas fontes, neste caso, o inibidor de urease não teve influência nas perdas de N, e ambos tiveram uma perda acumulada de somente 4 % do N aplicado.

3. HIPÓTESES

A magnitude das perdas de N-NH_3 por volatilização nas diferentes localidades produtoras avaliadas na região Sul do Brasil é relacionada às condições climáticas e ao tipo de solo.

A adição de inibidores da urease e/ou inibidores da nitrificação à ureia diminuem as perdas de N-NH_3 por volatilização, aumenta a eficiência do N aplicado e o rendimento do milho, em comparação à ureia comum.

4. OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência da aplicação de inibidores de urease e/ou de nitrificação à ureia sobre as perdas de N-NH_3 por volatilização, na eficiência agronômica da adubação nitrogenada e no rendimento do milho em comparação à ureia comum na região Sul do Brasil.

5. ESTUDO I - MITIGAÇÃO DAS PERDAS DE N POR VOLATILIZAÇÃO PELA ADIÇÃO DE INIBIDOR DA UREASE À UREIA NA CULTURA DO MILHO EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL

5.1 Introdução

Na cultura do milho, assim como nas demais culturas, existe uma defasagem muito expressiva entre a produtividade média de 6,5 Mg ha⁻¹, obtida em lavouras comerciais, na safra 2016/17, no Sul do Brasil (CONAB, 2018), e os rendimentos superiores a 12-14 Mg ha⁻¹ da cultura obtidos em nível experimental (Serpa et al., 2012, Sangoi et al., 2012, IAPAR, 2017). Condições adequadas no que se refere ao volume e distribuição de chuva, temperaturas noturnas amenas, condições de adequado manejo fitossanitário e de controle de ervas daninhas são fatores determinantes para um alto rendimento desta cultura.

Além disso, o manejo da fertilidade também é um dos principais fatores envolvidos nas elevadas produtividades do milho. A adequada disponibilidade de N no solo para a cultura merece destaque devido a complexa dinâmica deste elemento no sistema solo-planta-atmosfera, o qual apresenta diversos processos de perdas como lixiviação, volatilização, desnitrificação, bem como a imobilização microbiana que, apesar de temporária, pode resultar numa insuficiente disponibilidade de N para a cultura.

Dentre os processos de perda de N, a volatilização merece destaque pela magnitude das perdas que têm sido alcançadas no sistema plantio direto (Cantarella e Marcelino, 2007). Apesar destas perdas de N-NH₃ por volatilização sejam em torno de 20 a 30 % do N aplicado (Viero et al., 2017), estas são perdas importantes principalmente quando se trata de um nutriente de custo elevado. Altas temperaturas e umidade de solo suficiente para solubilização do fertilizante, mas insuficiente para a difusão do íon NH₄⁺ no solo (Holcomb III et al., 2011) são normalmente condições propícias para elevadas perdas de N-NH₃ por volatilização, principalmente, em solos arenosos com baixa capacidade de tamponamento do pH (Vieira et al., 2008) e com aplicação do fertilizante sobre a palhada em áreas com plantio direto (Rojas et al., 2012).

Dentre as alternativas de mitigação das perdas de N por volatilização, uma estratégia que vem se mostrando eficiente é o uso do inibidor de urease (NBPT [N-(N-butil) tiofosfórico triamida]). A molécula do NBPT age sobre o sítio ativo da enzima urease, impedindo a ligação da enzima à molécula de ureia, reduzindo a taxa de conversão do N amídico (N-NH₂) para a forma amoniacal (N-NH₄⁺) (Sanz-Cobena et al., 2011). Com a hidrólise da ureia temporariamente inibida, o fertilizante tem um tempo maior para ser incorporado ao solo pela chuva, reduzindo as perdas de N por volatilização em mais de 50 % do N aplicado (Silva et al., 2017). Entretanto, a eficiência do inibidor de urease em reduzir as perdas de N-NH₃ deve ser avaliada regionalmente, sendo dependente das condições ambientais, do tipo de solo e do sistema de manejo adotado.

O presente estudo teve por objetivo avaliar o potencial do inibidor de urease NBPT na diminuição das perdas de N-NH₃ por volatilização da ureia aplicada na cultura do milho em plantio direto, em três locais com diferentes condições climáticas e tipos de solo da região Sul do Brasil. Adicionalmente, realizou-se um estudo de incubação em laboratório o qual visou avaliar, sob condições controladas, a eficiência da aplicação do NBPT à ureia em reduzir a taxa de formação de NH₄⁺ e de elevação do pH do solo.

5.2 Material e Métodos

Este estudo foi realizado, na safra 2016/17, em Eldorado do Sul e Passo Fundo, no RS, e em Guarapuava, PR (Figura 2). Na Tabela 1 constam os dados dos locais em uma síntese de informações referentes a localização, dados climáticos, tipos de solo e também informações dos experimentos conduzidos, como análise química dos solos, teor de argila do solo, entre outras características. Nos três locais, avaliou-se as perdas de N-NH₃ por volatilização na cultura do milho em plantio direto.

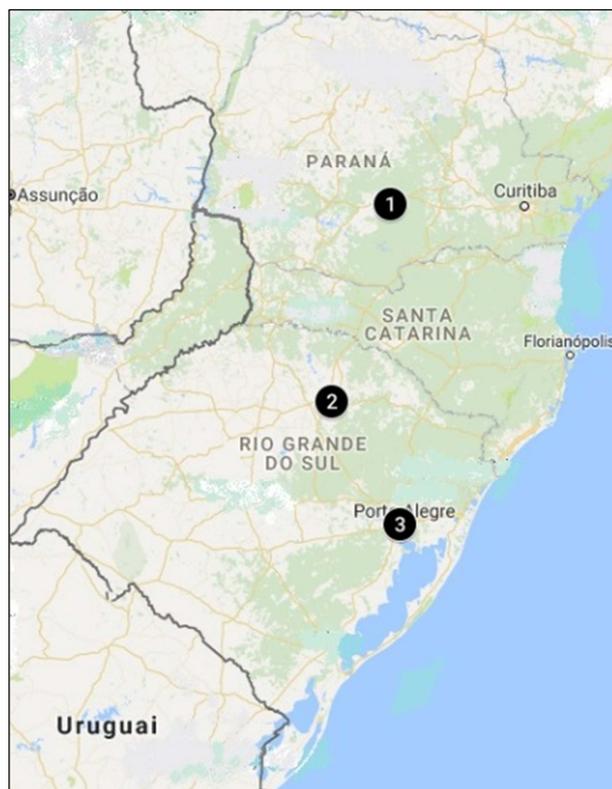


Figura 2. Mapa da Região Sul, Guarapuava (1) no estado do Paraná e Passo Fundo (2) e Eldorado do Sul (3) no estado do Rio Grande do Sul.

5.2.1 Tratamentos e delineamento experimental

Nos três locais, os experimentos seguiram um delineamento de blocos ao acaso, com quatro (Eldorado do Sul e Guarapuava) e três repetições (Passo Fundo). Os tratamentos consistiram da aplicação de N na forma de ureia comum, ureia com inibidor de urease (NBPT) e um tratamento sem aplicação de N (controle). As doses de N aplicadas variaram entre os locais (120 kg ha^{-1} em Eldorado do Sul, 100 kg ha^{-1} em Passo Fundo, e 180 kg ha^{-1} em Guarapuava), sendo aplicado em cobertura, em dose única, nos estádios V6 - V7 da cultura do milho (Ritchie et al., 1993). A ureia com o NBPT recebeu uma dose do produto proporcional a $2,5 \text{ L t}^{-1}$ de ureia (produto com 20 % de NBPT).

Tabela 1. Síntese de informações referentes aos locais e experimentos conduzidos em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava, na safra 2016/17.

	Eldorado do Sul	Passo Fundo	Guarapuava
Área experimental	Estação Experimental Agronômica (EEA) da UFRGS	Área experimental da Embrapa Trigo	Estação Experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA)
Coordenadas	30° 50' 52" S e 51° 38' 08" O	28° 13' 14" S e 52° 24' 20" O	25° 32' 53" S e 51° 29' 19" O
Clima (conforme Köppen)	Subtropical úmido "Cfa"	Subtropical úmido "Cfa"	Subtropical úmido "Cfb"
Temperatura (média anual °C)	19,4	17,5	16,8
Precipitação (média anual mm)	1.440	1.800	1955
Tipo de Solo			
Classificação Brasileira ¹	Argissolo Vermelho Distrófico	Latossolo Vermelho Distrófico	Latossolo Bruno alumínico
Classificação Americana ²	Alfisol	Hapludox	Hapludox
Teor de Argila (g kg⁻¹)	240	560	610
		Atributos químicos (0 – 10 cm)	
MO (g dm⁻³)	21,0	30,5	59,0
pH (H₂O)	5,3	5,6	5,5
K (cmol_c dm⁻³)	0,35	0,38	0,40
CTC_{pH7,0} (cmol_c dm⁻³)	9,70	13,70	16,67
P (mg dm⁻³)	61,00	14,55	22,70

¹(Embrapa, 2013), ²(Soil Survey Staff, 2014), MO: matéria orgânica, CTC: capacidade de troca de cátions.

5.2.2 Condução dos experimentos

A semeadura do milho foi realizada na época recomendada nos diferentes locais, tendo sido realizada em setembro em Eldorado do Sul e Guarapuava, e em novembro em Passo Fundo. A semeadura foi mecanizada e sobre a palhada de aveia preta (plantio direto) nos três locais, 15 a 30 dias após a dessecação com herbicida a base de glifosato. Na condução da cultura foram realizados todos os tratamentos culturais e tratamentos fitossanitários preconizados para a cultura do milho. Os híbridos utilizados foram AG 9025 PRO3 em Eldorado do Sul, Dekalb 240 PRO3 em Passo Fundo, e P3456H em Guarapuava, com uma densidade de 9, 8 e 7 plantas m^{-2} , respectivamente. A adubação de base em Eldorado do Sul e Passo Fundo foi realizada segundo o manual de adubação para os Estados do RS e SC (CQFS, 2016) e em Guarapuava segundo as recomendações desenvolvidas para a região Centro-Sul do PR (Fontoura et al., 2015).

5.2.3 Dados meteorológicos

Durante o período de avaliação da volatilização foram obtidos dados diários de temperatura do ar e precipitação nos três locais em estações automáticas localizadas a menos de 2 km das áreas experimentais. Exceção para os dados de precipitação em Eldorado do Sul, os quais foram obtidos de pluviômetro localizado na área experimental.

5.2.4 Quantificação das perdas de N por volatilização de amônia

As perdas de N por volatilização foram avaliadas utilizando um coletor do tipo semiaberto estático, descrito por Nömmik (1973), com alterações propostas por Lara Cabezas e Trivelin (1990). Os coletores consistiram de um cilindro de acrílico transparente com 0,15 m de diâmetro e 0,35 m de altura, sobre o qual foi disposta uma proteção, visando evitar incidência de água da

chuva no interior do coletor (Da Ros et al., 2005) (Figura 3A). Em cada coletor foram dispostas duas esponjas de polipropileno (2,0 cm de espessura e densidade 28 g dm^{-3}), embebidas com 70 mL de solução de ácido fosfórico (50 mL L^{-1}) e glicerina (40 mL L^{-1}). A primeira esponja, disposta na parte inferior da câmara, a uma altura de 15 cm do solo, teve como objetivo captar a amônia volatilizada do solo na parte interna da câmara. A segunda esponja, disposta a 30 cm do solo, teve a função de captar a amônia externa às câmaras, evitando a contaminação da esponja inferior (Da Ros et al., 2005).

Os coletores foram instalados sobre bases de cloro polivinil (PVC), previamente inseridas a 2,5 cm de profundidade no solo. O número de bases variou entre os locais avaliados, correspondendo ao número de avaliações realizadas em cada local (7 em Eldorado do Sul, 8 em Passo Fundo, e 5 em Guarapuava). Em cada coleta, o coletor era transferido para uma base subsequente (Figura 3B), no qual, o solo no interior do anel tinha sido exposto às condições ambientais (chuva, vento, temperatura) do período prévio a coleta, o que não ocorreria caso o coletor fosse instalado sempre sobre um mesmo anel (Cantarella et al., 1999).

A adubação nitrogenada foi aplicada manualmente a lanço na superfície do solo e após a aplicação na parcela, aplicou-se a quantidade exata de N correspondente às doses utilizadas na área da base, sendo instalado o coletor sobre o primeiro anel. Transcorrido o primeiro período de amostragem (1-2 dias), a esponja inferior foi removida sendo repostada uma nova esponja embebida com a mesma solução ácida e o coletor foi disposto sobre o segundo anel, e assim sucessivamente até o último anel em cada local de avaliação.

A amônia retida na esponja foi extraída por sucessivas lavagens, com solução de KCl a $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, coletada em balão volumétrico de 500 mL, cujo volume foi completado com água destilada. Uma alíquota de 20 mL foi retirada desse volume, à qual foi adicionado 0,2 g de MgO e submetida à destilação com arraste a vapor em destilador semimicro Kjeldahl (Tedesco et al., 1995). A quantidade de amônia volatilizada em cada tratamento foi calculada com base no volume total da solução utilizada para lavagem das esponjas (500 mL). Os

resultados foram expressos em taxas diárias de volatilização de N-NH_3 ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) e porcentagem do N aplicado.

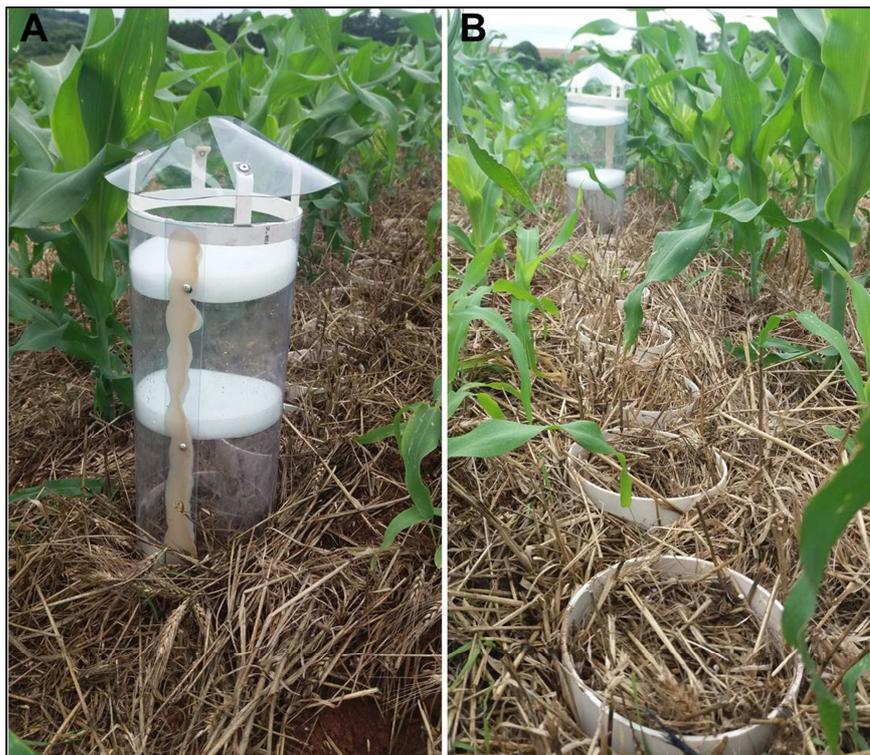


Figura 3. Coletor usado na quantificação das perdas de N por volatilização de amônia (A) e as bases subsequentes para que o solo no interior do anel de PVC ficasse exposto às condições ambientais (B).

5.2.5 Estudo de incubação em laboratório

Visando avaliar a capacidade de tamponamento de pH dos solos e obter informações sobre a influência do inibidor de urease adicionado à ureia na transformação do N-NH_2 para N-NH_4^+ nos diferentes solos em comparação a ureia comum (sem adição de inibidor de urease) foi realizado um estudo de incubação baseado na metodologia adaptada de Barth (2009).

O estudo teve duração de 29 dias no qual foi adicionada uma dose de N equivalente a 400 kg ha^{-1} ($\sim 500 \text{ mg kg}^{-1}$) à uma amostra da camada superficial (0-10 cm) dos solos coletados nas áreas experimentais de Eldorado do Sul,

Passo Fundo e Guarapuava. As fontes usadas neste experimento foram ureia e ureia mais NBPT, e um tratamento controle sem adição de N, os quais foram dispostos segundo um delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições.

Amostras de solo (5 g de solo úmido) foram acondicionadas em tubos plásticos de 50 mL e incubadas a uma umidade de 60 % da capacidade de campo e temperatura de 25–28 °C, em incubadora BOD. Os tratamentos foram aplicados em 9 frascos que foram utilizados para a avaliação das alterações de pH e teores de N-NH_4^+ aos 1, 2, 3, 4, 6, 8, 17, 22 e 29 dias de incubação. A cada avaliação, foram adicionados 12,5 mL de água aos tubos contendo o solo e avaliou-se o $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (1:2,5) e na sequência foram adicionados ao extrato mais 12,5 mL de solução de KCL 4 mol L^{-1} (relação solo-solução 1:5), para posterior determinação de NH_4^+ por destilação (Tedesco et al., 1995).

Para a análise dos resultados, foi subtraída a concentração de NH_4^+ do tratamento controle dos demais tratamentos, para que os resultados expressassem somente a diferença do N aplicado via fertilizantes. A intensidade de NH_4^+ , a qual corresponde ao teor médio ponderado do íon no período de incubação, foi calculada pela integração matemática da curva dos teores destes íons no período de 29 dias, com o intuito de visualizar o comportamento deste íon no tempo.

5.2.6 Análise estatística

A normalidade dos resultados foi avaliada segundo o teste Kolmogorov-Smirnov. Os resultados foram submetidos à análise da variância pelo teste F ($p < 0,05$) e quando significativo, a diferença entre as médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Tukey ao nível de 5%. As análises foram realizadas com o auxílio do programa estatístico Sisvar (Ferreira, D.F., 2011).

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Condições meteorológicas

A ocorrência de chuva no período imediatamente após a aplicação do fertilizante é determinante para o comportamento da volatilização de amônia. Verifica-se na Figura 4 que em Eldorado do Sul não ocorreu chuva nos 4 dias que sucederam a aplicação de N, já em Passo Fundo e Guarapuava tiveram chuvas porém com um volume muito baixo, inferiores a 6 mm. No 5º dia que sucedeu a aplicação de N verificou-se um grande volume de chuva em Eldorado do Sul (43 mm) e em Passo Fundo (65,2 mm), enquanto em Guarapuava somente ocorreram volumes de chuva superiores a 20 mm a partir do 10º dia após a aplicação de N (Figura 4).

As temperaturas diárias não variaram expressivamente no período de avaliação. As temperaturas médias nos cinco primeiros dias de avaliação foram de 21,8 °C (variando as médias diárias de 13,1 - 31,0 °C) em Eldorado do Sul, 22,6 °C (variando as médias diárias de 17,9 - 28,9 °C) em Passo Fundo, e de 17,9 °C (variando as médias diárias de 12,5 - 24,9 °C) em Guarapuava (Figura 4). Em termos de nebulosidade (dados não apresentados), os dias que sucederam a aplicação de N foram ensolarados em Eldorado do Sul, e parcialmente nublados e com ocorrência de garoas em Passo Fundo e Guarapuava.

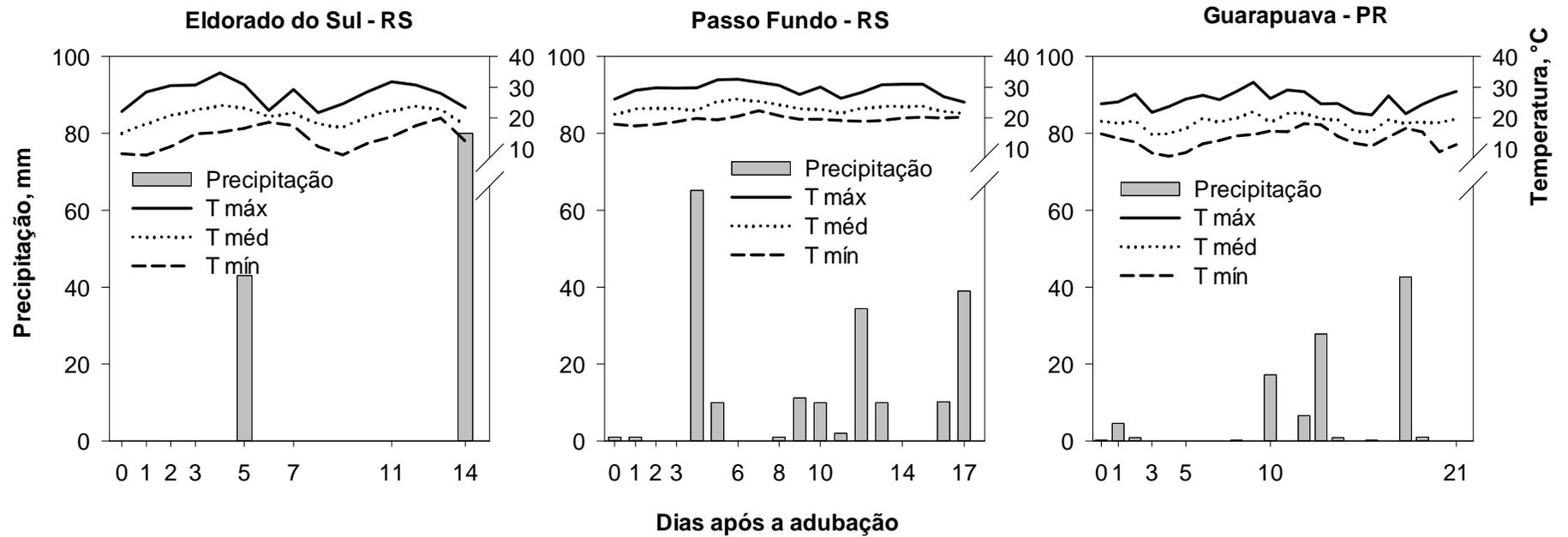


Figura 4. Precipitação, temperatura máxima, mínima e média durante o período de avaliação em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava, na safra de verão 2016/17.

5.3.2 Taxa diária de volatilização de amônia

As maiores taxas diárias de volatilização de N-NH₃ ocorreram nos primeiros cinco dias após a aplicação da ureia comum e da ureia mais inibidor de urease nos três locais (Figura 5). Essas perdas praticamente cessaram após a ocorrência de um volume maior de chuva no 5º dia em Eldorado do Sul (43 mm) e no 10º dia em Guarapuava (65,2 mm). Em Passo Fundo, apesar de terem ocorrido alguns picos, as taxas de volatilização de amônia foram bem inferiores aos outros dois locais.

Em Eldorado do Sul, os maiores picos de volatilização de amônia foram verificados com a aplicação de ureia comum e ocorreram no segundo dia após a aplicação do fertilizante (Figura 5a), com a taxa de 14,2 kg ha⁻¹ d⁻¹ de N-NH₃. No terceiro dia após a adubação com ureia+inibidor de urease a taxa de volatilização de N-NH₃ foi de 2,6 kg ha⁻¹ d⁻¹, que corresponde a uma redução de 85% na taxa de volatilização em relação ao tratamento com ureia comum.

Em Passo Fundo e Guarapuava os picos de volatilização de N-NH₃ da ureia comum foram bem inferiores aos verificados em Eldorado do Sul, tendo sido verificadas taxas de volatilização de N-NH₃ quando da aplicação de ureia comum de 2,6 e 3,9 kg ha⁻¹ d⁻¹, respectivamente ocorridos no 2º e 3º dia após a aplicação nesses locais (Figura 5b, c). Similar ao verificado em Eldorado do Sul, quando da aplicação da ureia+inibidor de urease as perdas de N-NH₃ foram inferiores às da ureia comum, com picos de perdas diárias de 1,0 e 0,65 kg ha⁻¹ d⁻¹ de N em Passo Fundo e Guarapuava, respectivamente.

Possivelmente, as menores taxas diárias de volatilização de N-NH₃ em Passo Fundo e Guarapuava, estejam parcialmente relacionadas ao volume de chuva ocorrida nos primeiros quatro dias após a aplicação dos fertilizantes, além da temperatura mais amena (Figura 4). Entretanto, o tipo de solo no que se refere a capacidade de tamponamento da variação do pH ao redor dos grânulos da ureia talvez também possa ser um fator responsável pelas menores perdas de amônia por volatilização nestes dois solos argilosos (Tabela 1).

5.3.3 Perda acumulada de N por volatilização de amônia

Quando da aplicação de ureia comum, a maior perda acumulada de N por volatilização de amônia ocorreu em Eldorado do Sul (28,2 % do N aplicado), em Guarapuava foi intermediária (13,9 % do N aplicado), e a mais baixa foi em Passo Fundo (4,7 % do N aplicado) (Figura 5 d, e, f). Tanto em Eldorado do Sul quanto em Guarapuava, a adição de inibidor de urease à ureia promoveu redução significativa das perdas de N por volatilização de $N-NH_3$: 76 % em Eldorado do Sul e 50 % em Guarapuava (Figura 5 d, f), enquanto que em Passo Fundo a volatilização de $N-NH_3$ não se diferenciou entre os fertilizantes ($p < 0,05$), com uma perda de 4,7 % para ureia comum e 3,5 % do N aplicado para a ureia com o inibidor de urease (Figura 5e).

Recentemente, Fontoura & Bayer (2010) observaram uma relação exponencial inversa entre o volume de chuva e a volatilização de amônia nos cinco dias que sucederam a aplicação de N, e isso pode ser explicado pelo efeito físico da chuva “lavando” a ureia da palha e a colocando em contato com o solo (Lara Cabezas et al., 1997). Além disso, pelo efeito de difusão do íon amônio para zonas de solo mais distante dos grânulos de ureia e menos suscetível ao aumento do pH do solo, também reduz as perdas por volatilização (Fontoura & Bayer, 2010).

Entretanto, no presente estudo foi verificada uma relação diferente entre as perdas de $N-NH_3$ por volatilização e o volume de chuva nos quatro dias que sucederam a aplicação da adubação nitrogenada. As perdas intermediárias ocorreram em Guarapuava, onde o volume de chuva nesse período de quatro dias após a aplicação (5,6 mm) foi grande o suficiente para promover a solubilização do fertilizante, mas não o suficiente para promover a difusão do íon NH_4^+ no interior do solo. Por sua vez, em Passo Fundo o volume de chuva (< 0,5 mm) nesse curto período possivelmente não chegou a solubilizar o fertilizante, resultando em perdas de N por volatilização de amônia muito inferior aos dois outros locais.

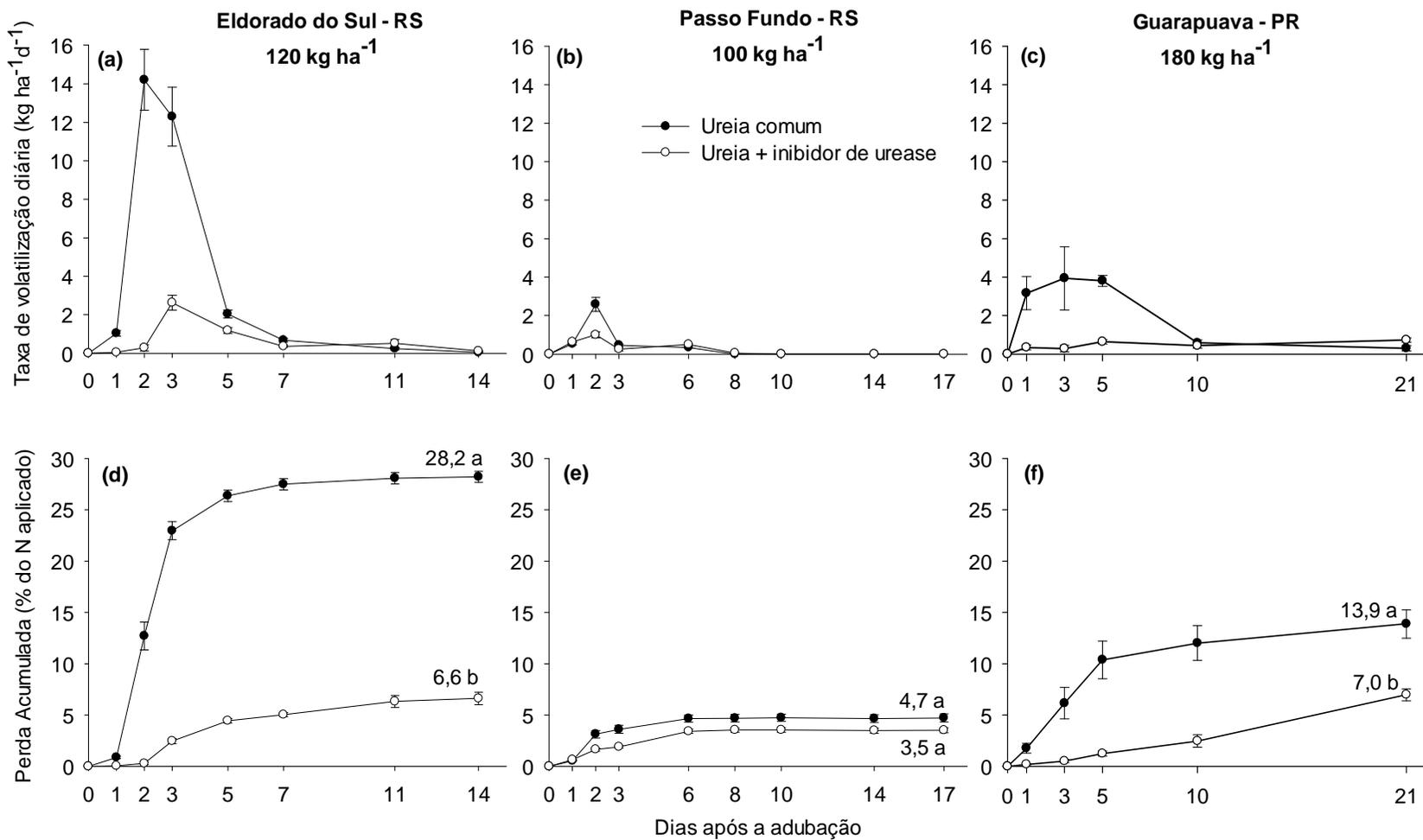


Figura 5. Taxa diária (a, b, c) e perda acumulada (d, e, f) de N por volatilização de amônia em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava, na safra de verão 2016/2017. Barras verticais indicam o erro padrão da média.

Como estratégia de reduzir perdas de N-NH_3 por volatilização, tem se destacado a utilização da ureia com inibidor de urease tanto em outros países (Abalos et al., 2014, Ahmed et al., 2018), como no Brasil (Silva et al., 2017; Viero et al., 2017). A estabilidade do N decorrente da adição do NBPT à ureia tem como principal benefício o atraso no pico de volatilização. Isso proporciona um maior número de dias, após a adubação nitrogenada, para sua incorporação pelas águas das chuvas ou irrigação e, conseqüentemente, uma redução das perdas de N por volatilização (Watson et al., 2008). Isso ocorre porque os inibidores de urease reduzem a taxa de conversão do N na forma amídica (N-NH_2) para a forma amoniacal (N-NH_4^+) devido a redução da atividade da urease no solo (Timilsena et al., 2014).

5.3.4 Estudo de incubação em laboratório

Em relação ao efeito da adição do inibidor de urease à ureia comum, verificou-se uma redução na amonificação do N-NH_2 nos primeiros três dias (Figura 6). Esse efeito foi evidenciado pelo aumento menos expressivo do pH do solo quando aplicada ureia mais inibidor de urease em comparação com a ureia comum, nos três solos e nos dias imediatamente após a aplicação dos fertilizantes (Figura 6a, b, c). Esse efeito aparentemente foi mais expressivo em termos absolutos no Argissolo (240 g kg^{-1} argila) de Eldorado do Sul, do que nos Latossolos mais argilosos de Passo Fundo (560 g kg^{-1} argila) e Guarapuava (610 g kg^{-1} argila). Essa diferença possivelmente esteja relacionada à capacidade de tamponamento do pH dos solos, e isso também diz respeito, além do teor de argila, aos maiores teores de MO nos Latossolos (Passo Fundo $30,5$ e Guarapuava $59,0 \text{ g dm}^{-3}$) do que no Argissolo (Eldorado do Sul $21,0 \text{ g dm}^{-3}$) (Tabela 1). Em relação as perdas de N por volatilização de amônia, solos que possuem uma maior capacidade de tamponamento do pH próximo aos grânulos da ureia quando da solubilização do fertilizante, potencialmente devem apresentar menor volatilização de amônia (Holcomb III et al., 2011). Isso

acontece porque a elevação do pH ao redor do grânulo determina a formação de NH_3 que pode ser perdida para a atmosfera, como já foi visto na equação 2.

A variação da concentração de NH_4^+ no solo decorrente da aplicação dos fertilizantes foi similar à verificada no pH. No segundo dia após a aplicação dos fertilizantes, para o solo de Eldorado do Sul, o tratamento com ureia comum apresentou uma concentração de 224 mg kg^{-1} de N-NH_4 (~45 % do N aplicado), enquanto que o tratamento com inibidor de urease apresentou 109 mg kg^{-1} de N-NH_4 (~22 % do N aplicado) (Figura 6d), representando uma redução de aproximadamente 50 % na taxa de amonificação. A menor amonificação do N-NH_2 do fertilizante associada a uma menor elevação do pH no solo ao redor dos grânulos de fertilizante são determinantes do impacto positivo do inibidor de urease na diminuição da taxa de volatilização de NH_3 em comparação à ureia comum.

Para os solos de Passo Fundo e Guarapuava, a concentração de amônio também reduziu quando foi adicionado o inibidor de urease à ureia, sendo que suas concentrações, no segundo dia após a aplicação dos fertilizantes, passaram de 207 e 217 mg kg^{-1} de N-NH_4 (~41 e 43 % do N aplicado) no tratamento com ureia comum, para 104 e 72 mg kg^{-1} de N-NH_4 (~21 e 14 % do N aplicado) para o tratamento com inibidor de urease, respectivamente. Isso representa uma redução de 50 % no caso de Passo Fundo e de 67 % no caso de Guarapuava (Figura 6e, f). A hidrólise da ureia no solo é diretamente dependente da atividade da enzima urease (Sanz-Cobena et al., 2011), sendo que quando esta enzima fica temporariamente com a sua atividade inibida, ocorre então uma redução na transformação de N para formas amoniacais.

Já a intensidade do íon NH_4^+ (Tabela 2) não foi eficiente em mostrar o benefício do inibidor de urease sobre a ureia comum, pois como a intensidade é um índice que representa todo o período de incubação e com o tempo o inibidor perde seu efeito, os índices foram iguais para os dois tratamentos no solo de Eldorado do Sul e no solo de Guarapuava.

Tabela 2. Intensidade do íon amônio ($\text{mg kg}^{-1}\text{d}^{-1}$) durante os 29 dias de incubação nos solos de Eldorado do Sul, Passo Fundo e Guarapuava.

Tratamento	Intensidade de NH_4^+ ($\text{mg ha}^{-1}\text{d}^{-1}$)		
	Eldorado do Sul	Passo Fundo	Guarapuava
Ureia comum	108,2 Ba	113,7 Bb	138,9 Aa
Ureia com inibidor de urease	103,3 Ca	158,2 Aa	135,8 Ba

Tratamentos com médias seguidas por letras iguais, maiúsculas na linha e minúscula na coluna, não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5 %.

No solo de Passo Fundo observamos um comportamento diferente em relação aos dois tratamentos. Neste caso, o solo que recebeu o tratamento da ureia com o inibidor de urease apresentou uma intensidade de NH_4^+ maior que o solo que recebeu a ureia comum, mesmo que a quantidade de N aplicada foi a mesma para ambos. Entretanto, essa intensidade do íon NH_4^+ deve ser calculada para o período inicial logo após a aplicação do fertilizante, pois o efeito do inibidor de urease não é persistente durante todo o período amostral e daí o efeito no período inicial se dilui no período amostral. Portanto, em futuros estudos sugere-se que a intensidade do íon NH_4^+ seja calculada para o período de 4-5 dias imediatamente após a aplicação do N.

Quando analisamos a intensidade de N-NH_4^+ entre os locais, verificamos uma diferença entre os solos. Essa diferença pode ser explicada pelos teores de MO nos solos. Como o latossolo de Guarapuava possui um alto teor de MO, também possui uma fonte de N que durante os quase 30 dias de incubação foi sendo mineralizado, se refletindo numa maior intensidade de N-NH_4^+ .

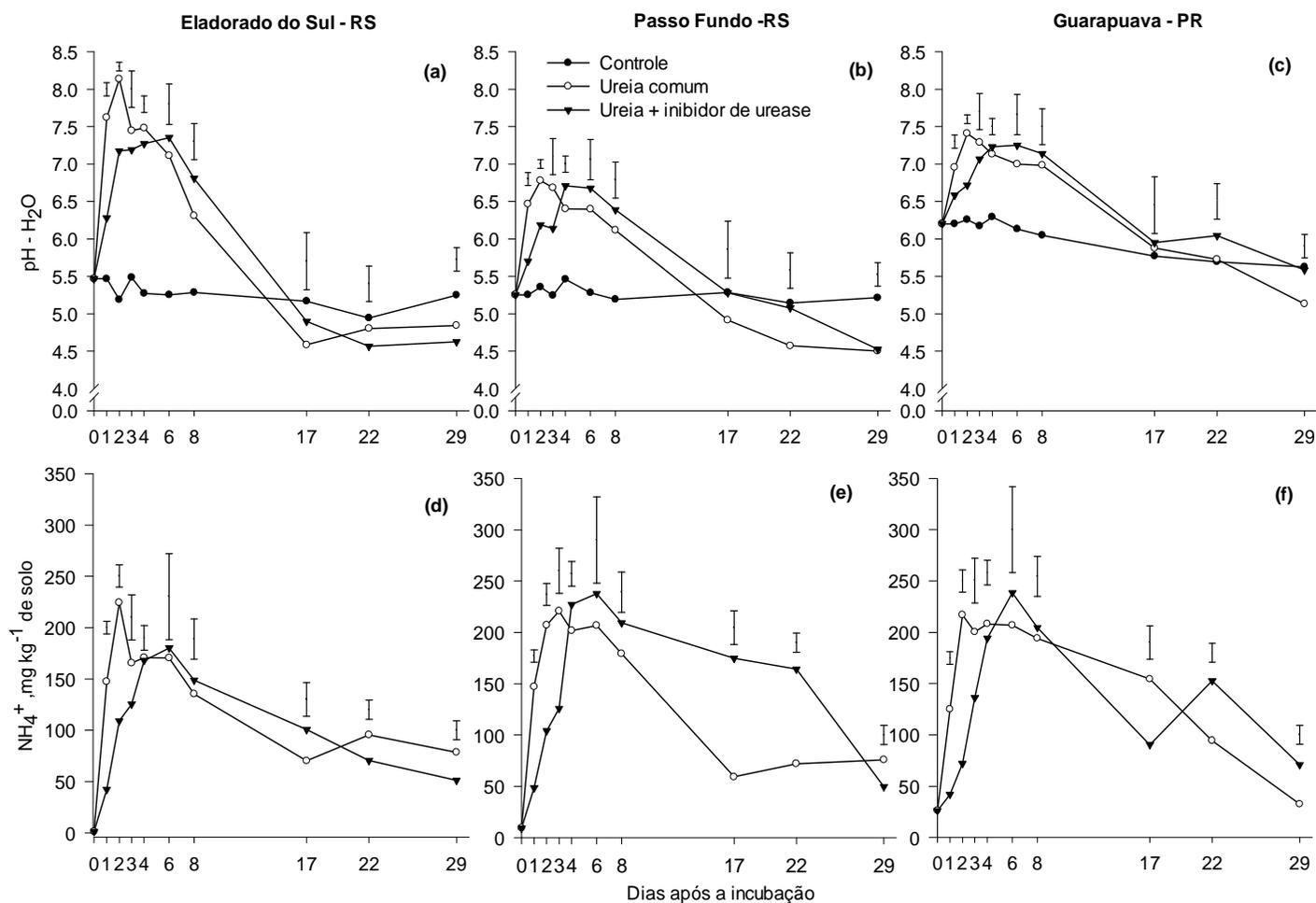


Figura 6. Variação do pH (a, b, c) e teores de amônio (d, e, f) no solo sob aplicação de uma dose equivalente a 400 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia comum e de ureia + inibidor da urease (NBPT) no Argissolo de Eldorado do Sul e nos Latossolos de Passo Fundo e de Guarapuava ao longo de 29 dias de incubação. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos segundo teste de Tukey (p ≤ 0,05), exceto o controle na variável pH.

5.4 Conclusões

- As maiores perdas N por volatilização de amônia em Eldorado do Sul foi devido a não ocorrência de chuva nos dias que seguiram a aplicação do fertilizante. Já em Guarapuava a chuva de 5,6 mm foi grande o suficiente para a solubilização da ureia, mas não suficiente para a difusão do íon NH_4^+ no solo, resultando numa perda intermediária, enquanto que em Passo Fundo, a pouca chuva (< 0,5 mm) provavelmente nem foi suficiente para a solubilização do fertilizante e a perda foi mínima. Possivelmente, a condição de umidade do solo quando da aplicação dos fertilizantes também tenha influenciado as perdas de N-NH_3 por volatilização.

- Quando da ocorrência de condições propícias para a ocorrência de perdas de amônia por volatilização (Eldorado do Sul e Guarapuava), a adição de inibidor da urease à ureia foi eficiente em reduzir a volatilização de amônia. A redução da volatilização de amônia foi de 50% em Guarapuava e de 76% em Eldorado do Sul.

- A menor elevação do pH do solo e dos teores de NH_4^+ no solo incubado com ureia mais o inibidor de urease comparado com a ureia comum reforçam a eficiência do inibidor de urease em reduzir a hidrólise da ureia.

- A menor elevação dos valores de pH nos Latossolos argilosos de Passo Fundo e Guarapuava comparado com o Argissolo de Eldorado do Sul evidenciam também o possível efeito da argila e dos teores mais elevados de MO no tamponamento da elevação do pH, resultando em condições menos propícias para a volatilização de amônia nos Latossolos.

6. ESTUDO 2 – VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS ESTABILIZADOS NA CULTURA DO MILHO EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL

6.1 Introdução

A cultura do milho é de grande importância no sistema de produção agropecuária. É um dos principais insumos na produção de frangos, suínos e de leite, bem como sua introdução na rotação com soja. Em rotação com soja é bastante preconizada pelos benefícios no controle de ervas daninhas, redução da fonte de inóculo de doenças, maior aporte de palhada e mais persistente cobertura de solo, com reflexos no balanço de C e controle da erosão no sistema plantio direto (Bayer & Mielniczuk, 1999, Franchini et al., 2011, Boddey et al., 2010). Atualmente, a área de milho no RS é inferior a 1 Mha, representando menos de 10 % da área total cultivada no verão, evidenciando uma extensa monocultura de soja (CONAB, 2018).

Portanto, um dos aspectos de melhoria do manejo de solos em plantio direto é a redução da frequência do pousio invernal e de outono, e o aumento da proporção de milho na rotação com soja no verão. Nesse sentido, a adubação nitrogenada da cultura do milho é um aspecto bastante relevante pois apresenta uma proporção de aproximadamente 50 % do custo de adubação da cultura do milho, e o aumento da eficiência agronômica deste nutriente pode ser um aspecto relevante para aumentar a lucratividade da cultura e a sua ampliação em área no Sul do Brasil.

O N é um nutriente cuja dinâmica no solo é bastante complexa, e isto dificulta a existência de critérios simples para uma adequada e eficiente adubação nitrogenada. O N pode ser perdido no solo por lixiviação, desnitrificação e, principalmente, por volatilização como amônia. Além disso, o N pode ser imobilizado pela microbiota do solo e se manter temporariamente indisponível para as plantas, até que esse N seja novamente mineralizado (Aita et al., 2004, Giacomini et al., 2004).

Recentemente, diversos estudos tem sido realizados no Brasil quanto ao efeito do manejo de solos nas perdas de N por volatilização de amônia, demonstrando as maiores perdas em solos sob plantio direto (Rojas et al, 2012), principalmente quando da aplicação em solo úmido (Viero et al, 2017). Nessa situação as perdas de N-NH₃ atingem valores superiores a 50 % do N da ureia aplicado na região Sudeste e Centro-Oeste (Pedrosa, 2013), enquanto os valores médios para a região Sul do Brasil oscilam ao redor de 20 % do N aplicado, possivelmente pela ocorrência de temperaturas mais amenas (Viero et al., 2017). Por sua vez, a aplicação do fertilizante nitrogenado anterior à chuva ou a realização de irrigação após a adubação, a incorporação do fertilizante ao solo e a substituição da ureia comum por ureia estabilizada, contendo inibidores de urease, tem sido mais recentemente avaliado no Brasil, com resultados animadores quando ao seu potencial de redução de perdas de N por volatilização (Viero et al., 2014; Pan et al., 2016; Silva et al., 2017), com reflexo positivo (Guelfi, D. 2017) ou não na produtividade das culturas (Viero et al, 2017).

Produtos comerciais com inibidores de urease já são disponíveis no mercado, e alguns estudos já foram conduzidos demonstrando a sua eficiência. Por sua vez, mais recentes no mercado brasileiro são os inibidores de nitrificação os quais tem por objetivo reduzir as perdas de N por lixiviação e desnitrificação (Yang et al., 2016). Alguns estudos conduzidos têm demonstrado que a eficiência destes inibidores, que podem ser aplicados à ureia isoladamente ou associados aos inibidores de uréase, é muito variável, a qual depende de fatores relacionados ao tipo de solo, manejo e tipo de cultura (Yang et al., 2016; Guelfi, 2017). Destaca-se que algumas empresas estão introduzindo esses produtos no mercado nacional e é importante a avaliação da sua eficiência a fim de que estes produtos venham a resultar em algum benefício ao sistema de produção.

O objetivo desse estudo foi avaliar a campo a eficiência do inibidor de urease NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida), isoladamente ou associado ao inibidor de nitrificação DCD (Dicianodiamida), na diminuição das perdas de N por volatilização de amônia, na eficiência agrônômica do N e no rendimento de grãos do milho cultivado no sistema plantio direto, na Depressão Central do RS. Além disso, foi realizado um estudo de incubação em laboratório, no qual avaliou-se a eficiência da aplicação dos inibidores de urease e de nitrificação à

ureia comum em reduzir as taxas de formação de NH_4^+ e NO_3^- , respectivamente, bem como em reduzir a elevação do pH do solo.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Experimento a campo

O experimento foi conduzido nos anos agrícolas 2015/16 e 2016/17 na Estação Experimental Agronômica (30° 50' 52" S e 51° 38' 08" O) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no município de Eldorado do Sul, RS. O clima da região é subtropical úmido "Cfa", conforme classificação climática de Köppen, com temperatura média anual de 19,4°C e precipitação média anual de 1.440 mm (Bergamaschi e Melo, 2013). O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Embrapa, 2013). A análise de solo realizada em maio de 2015 indicou os seguintes valores: 240 g kg⁻¹ de argila; pH (água) de 5,3; 61 mg dm⁻³ de P e 136 mg dm⁻³ de K pelo método Mehlich-1; 21 g kg⁻¹ de MO e CTC_{pH 7,0} de 9,7 cmol_c dm⁻³ (Miozzo, L.C., 2017).

Os tratamentos consistiram de quatro fontes de N e de três doses em cobertura na cultura do milho, além de um tratamento controle sem aplicação de N. Os tratamentos foram distribuídos segundo um esquema fatorial de 4x3+1, com quatro repetições. As fontes de N utilizadas foram: (i) ureia comum (U), (ii) ureia com inibidor de urease [N-(N-butil) tiofosfórico triamida - "NBPT"] (U+NBPT), (iii) ureia com inibidor de nitrificação [Dicianodiamida - "DCD"] (U+DCD), e (iv) ureia com inibidor de urease e nitrificação (U+NBPT+DCD). As doses aplicadas em cobertura foram de 50, 120 e 270 kg ha⁻¹ de N. A ureia recebeu uma dose do produto proporcional a 2,5 L t⁻¹ de ureia (quando os inibidores foram aplicados individualmente, utilizou-se um produto com 20 % de NBPT e outro com 28 % de DCD e quando utilizados de forma associada, utilizou-se um produto com 30 % NBPT + 15 % de DCD.).

A semeadura do milho (AG 9025 PRO3) foi realizada no mês de setembro em ambas as safras (01/9/2015 e 21/9/2016), sendo em ambos os anos o milho cultivado em sucessão à aveia branca (*Avena sativa* L.). A densidade final de plantas foi de 9,0 pl m⁻² e o espaçamento entrelinhas de 0,5 m. A área em que o experimento foi conduzido já vinha sendo utilizada no sistema plantio direto há mais de 20 anos com a sucessão de aveia preta no inverno e milho no verão.

A adubação na semeadura foi de 30, 180 e 90 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. A emergência das plântulas, nas duas safras, ocorreu em média 11 dias após a semeadura. Entre os estádios V₃ e V₄ (Ritchie et al,1993) as plantas receberam 30 kg ha⁻¹ de N, exceto no tratamento controle. A aplicação dos fertilizantes estabilizados (50, 120 e 270 kg ha⁻¹) foi realizada no estádio V₆ (27/10) em 2015/16 e estádio V₇ (03/11) em 2016/17. As coletas foram realizadas aos 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16 dias após a aplicação dos fertilizantes na primeira safra e aos 1, 2, 3, 5, 7, 11 e 14 dias após a aplicação dos fertilizantes na segunda safra.

Os dados meteorológicos do período amostral (Figura 5) na safra 2015/16 foram obtidos da Estação Meteorológica localizada em Porto Alegre do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distante aproximadamente 60 km da área experimental. Por sua vez, na safra 2016/17, os dados de temperatura foram obtidos junto à Estação Meteorológica automática localizada a 3 km da área experimental, enquanto os dados de precipitação pluviométrica durante a cultura do milho foram registrados manualmente através de um pluviômetro presente na área experimental.

6.2.2 Volatilização de amônia

As perdas de nitrogênio por volatilização foram avaliadas utilizando um coletor do tipo semiaberto estático, descrito por Nömmik (1973), com alterações propostas por Lara Cabezas & Trivelin (1990). As câmaras coletoras consistiram de um cilindro de acrílico transparente com 0,15 m de diâmetro e 0,35 m de

altura, sobre o qual foi disposta uma proteção, visando evitar incidência de água da chuva no interior da câmara (Da Ros *et al.*, 2005). As câmaras coletoras foram instaladas sobre bases de cloro polivinil (PVC), previamente inseridas a 2,5 cm de profundidade no solo.

O número de bases variou entre os anos avaliados, de acordo com a quantidade de coletas realizadas em cada ano. Em cada coleta, os coletores foram transferidos para as bases subsequentes e portanto, os resultados refletem as condições ambientais (chuva, vento, temperatura) do período anterior, sem as interferências causadas pela presença das câmaras (Cantarella *et al.*, 1999). As bases foram instaladas previamente à aplicação dos fertilizantes nitrogenados que foi realizada manualmente a lanço na superfície do solo. Após a aplicação na parcela, uma dose equivalente de N foi aplicada na área de cada base e em seguida, as câmaras coletoras foram instaladas. Em cada uma das câmaras, foram colocadas duas esponjas de polipropileno, com 2,0 cm de espessura e densidade 28 g dm^{-3} , embebidas por 70 mL de solução de ácido fosfórico (50 mL L^{-1}) e glicerina (40 mL L^{-1}). A primeira esponja, disposta na parte inferior da câmara, a uma altura de 15 cm do solo, teve como objetivo captar a amônia volatilizada do solo na parte interna da câmara, constituindo a amostra do estudo. A segunda esponja, disposta a 30 cm do solo, teve a função de captar a amônia externa às câmaras, evitando a contaminação da esponja inferior (Da Ros *et al.*, 2005).

A amônia retida na esponja foi extraída por sucessivas lavagens, com solução de KCl a $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, coletada em balão volumétrico de 500 mL, cujo volume foi completado com água destilada. Uma alíquota de 20 mL foi retirada desse volume, à qual foi adicionado 0,2 g de MgO e submetida à destilação com arraste a vapor em destilador semi-micro Kjeldahl (Tedesco *et al.*, 1995). A quantidade de amônia volatilizada em cada tratamento foi calculada com base no volume total da solução utilizada para lavagem das esponjas (500 mL), subtraindo os valores referentes ao tratamento testemunha. Os resultados foram expressos em taxas diárias de volatilização de N-NH_3 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) e em perda acumulada (porcentagem do N aplicado).

Simultaneamente às avaliações de volatilização, coletou-se uma amostra de solo na camada de 0 a 10 cm de profundidade na mesma base em que foi avaliada a volatilização, a qual foi utilizada para determinação da umidade do solo.

6.2.3 Estudo de incubação em laboratório

A fim de verificar a eficiência dos inibidores de urease e de nitrificação foi realizado um estudo de incubação baseado na metodologia adaptada de Barth (2009). O estudo teve duração de 29 dias no qual foi adicionada uma dose de N equivalente a 400 kg ha^{-1} ($\sim 500 \text{ mg kg}^{-1}$) ao solo da camada superficial (0-10 cm) da área experimental. Os mesmos tratamentos avaliados no experimento de campo foram avaliados (U, U+NBPT, U+DCD e U+NBPT+DCD), os quais foram dispostos segundo um delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. As amostras de solo úmido (5 g) foram acondicionadas em tubos plásticos de 50 mL e incubadas a umidade de 60 % da capacidade de campo e temperatura de 25 – 28 °C, utilizando uma incubadora BOD durante 29 dias.

Aos 1, 2, 3, 4, 6, 8, 17, 22 e 29 dias após a incubação foram avaliados pH em água e os teores de NH_4^+ e de NO_3^- no solo. Ao solo de cada frasco foram adicionados 12,5 mL de água e avaliou-se $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (1:2,5). Na sequência adicionou-se 12,5 mL de solução de KCL 4 mol L^{-1} (relação solo-solução 1:5) à suspensão de solo, sendo determinados os teores de amônio e nitrato (Tedesco et al., 1995).

Para a análise dos resultados, nos tratamentos com aplicação de fertilizante a concentração do íon (amônio ou nitrato) no solo foi subtraída da concentração do íon no solo no tratamento controle sem aplicação de N. Depois, visando interpretar o efeito dos inibidores nos processos de amonificação e de nitrificação no solo, os teores médios ponderados de NH_4^+ e NO_3^- no decorrer do período experimental foram calculados para todos os tratamentos através da integração matemática da área sob a curva dos teores de NH_4^+ e NO_3^- no solo.

6.2.4 Rendimento de grãos e eficiência agronômica de uso do N

O rendimento de grãos foi avaliado através da colheita de uma área útil de 13 m² por parcela e foi expresso a 13 % de umidade. A eficiência agronômica de uso do N (EAN) foi calculada pela metodologia proposta por Baligar *et al.* (1990), pela seguinte equação:

$$\text{Eficiência Agronômica de Uso do N} = \frac{(Rf - Rnf)}{\text{Dose}}$$

na qual a Eficiência de Uso do N é expressa em kg kg⁻¹ (kg de grão produzido por kg de N aplicado), *Rf* é o rendimento de grãos dos tratamentos com adubação nitrogenada (kg ha⁻¹), *Rnf* é o rendimento de grãos do tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha⁻¹) e Dose é a quantidade de N aplicada em cobertura (kg ha⁻¹).

6.2.5 Análise estatística

A normalidade dos resultados foi avaliada segundo o teste Kolmogorov-Smirnov. Os resultados do experimento de campo foram submetidos à análise da variância pelo teste F para os efeitos principais ($p < 0,05$) e para a interação ($p < 0,20$), conforme descrito por Perecin & Cargnelutti Filho (2008). Os resultados do estudo de incubação em laboratório foram submetidos à análise da variância pelo teste F ($p < 0,05$). Quando significativo, a diferença entre as médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Tukey ao nível de 5%. As análises foram realizadas com o auxílio do programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2011).

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Condições meteorológicas e umidade do solo

Em 2015/16, nos cinco primeiros dias após a aplicação de N a temperatura média diária foi de 22,0 °C, oscilando entre 18 °C e 31 °C durante

todo o período amostral (Figura 9a). Esse período foi caracterizado por dias ensolarados, ocorrendo a primeira chuva (12 mm) apenas no 5º dia após a aplicação do fertilizante, seguido de mais 5 mm (6º dia) e 49 mm (9º dia). Em 2016/17, a temperatura média diária nos cinco dias que sucederam a aplicação de N foi de 21,8 °C, oscilando entre 7,9 °C e 34,6 °C durante o período de coletas (Figura 9c). Nesse segundo ano, o período imediatamente após a aplicação do fertilizante também foi caracterizado por dias ensolarados, ocorrendo uma precipitação de 43 mm no 5º dia após a aplicação de N (Figura 9c).

A umidade do solo quando da aplicação de N foi muito similar entre as duas safras (0,14 g g⁻¹ em 2015/16 e 0,15 g g⁻¹ em 2016/17) (Figura 9b e d), indicando uma condição similar de solo para a hidrólise da ureia quando em contato com o solo, aspecto fundamental para a ocorrência das perdas de N por volatilização de amônia (Rochette et al., 2009). Considerando a umidade do solo similar, as maiores temperaturas ocorridas no período imediatamente após a aplicação de N determinaram um maior potencial de perdas de N por volatilização de amônia na segunda safra, mesmo considerando o grande volume de chuva ocorrido no 5º dia nesse ano, pois nesse momento usualmente a maior proporção da volatilização de amônia já ocorreu.

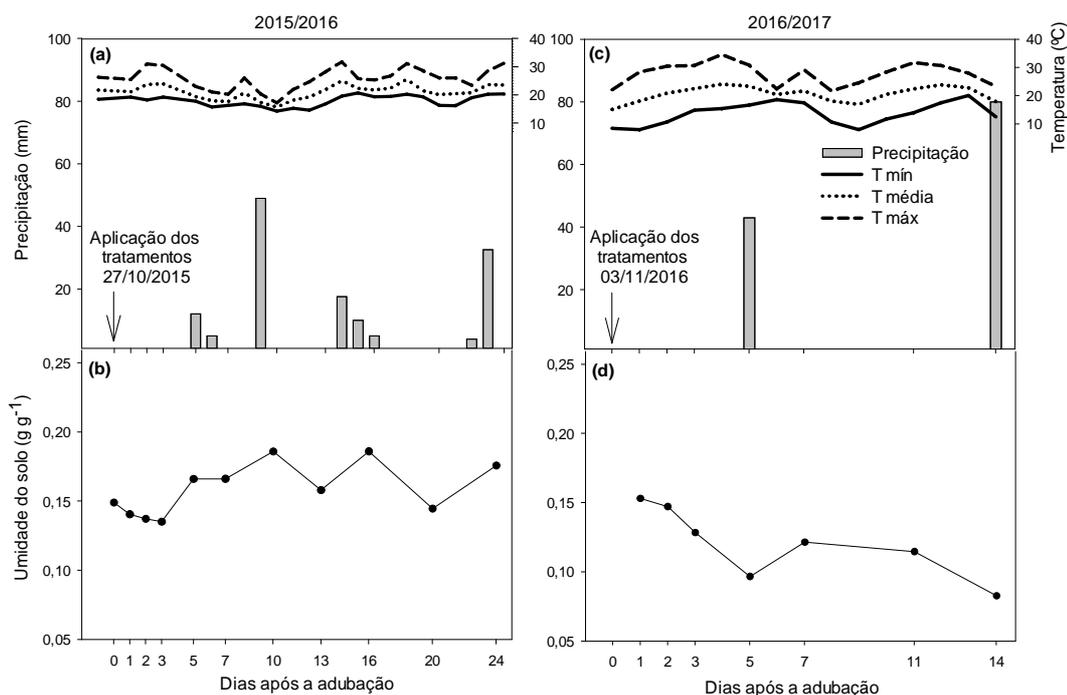


Figura 7. Temperatura do ar, precipitação pluviométrica e umidade do solo no período de coletas, nas safras 2015/16 (a e b) e 2016/17 (c e d).

6.3.2. Taxa de volatilização diária

As maiores taxas de volatilização diária concentraram-se nos cinco primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes nas duas safras. Os maiores picos de volatilização ocorreram até o segundo dia após a adubação, na dose de 270 kg ha⁻¹ de N. Na safra 2015/2016 o pico foi de 33,7 kg ha⁻¹d⁻¹ e ocorreu no tratamento com ureia comum. Na safra 2016/17, o pico foi 34,1 kg ha⁻¹d⁻¹ de N perdido na forma de amônia e ocorreu quando da aplicação da ureia+DCD (Figura 10c e f).

Um fator determinante da volatilização de amônia logo após a aplicação do fertilizante é a umidade do solo. Nas duas safras a umidade do solo estava em torno de 15 %, o que foi suficiente para a solubilização e hidrólise da ureia, com a transformação do N-NH₂ em N-NH₄⁺, aumentando o pH ao redor do grânulo do fertilizante o que, dependendo da difusão do amônio no solo e da capacidade do solo em tamponar as variações de pH, leva à ocorrência de altas taxas de volatilização de amônia (Guelfi, 2017).

Em um estudo de laboratório, Tasca et al. (2011) examinaram o efeito da umidade do solo nas perdas de N-NH_3 e encontraram aproximadamente 30 % de perdas por volatilização quando a ureia foi aplicada à superfície de um solo com 10 % de umidade. Essas perdas diminuíram para 15 % quando se aplicou a ureia à um solo com 5% de umidade. Mesmo sendo um experimento em condições controladas, esse estudo mostra como a umidade influencia diretamente nas perdas por volatilização de amônia.

Na média das duas safras, a aplicação de ureia comum resultou em picos de volatilização de amônia de 3,7, 9,5 e 33,1 $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ de N, nas doses de 50, 120 e 270 kg ha^{-1} de N, respectivamente (Figura 10). A adição do inibidor de urease (NBPT) à ureia, isoladamente ou associado ao inibidor de nitrificação, foi eficiente em reduzir os picos de volatilização de amônia em ambas as safras. Na média, os picos das taxas diárias de volatilização de amônia reduziram para 1,0, 3,6 e 6,0 $\text{kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$ de N e quando o inibidor de urease foi associado ao inibidor de nitrificação reduziram para 1,0, 1,2 e 7,0 $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ de N, quando da aplicação das doses de 50, 120 e 270 kg ha^{-1} de N, respectivamente (Figura 10).

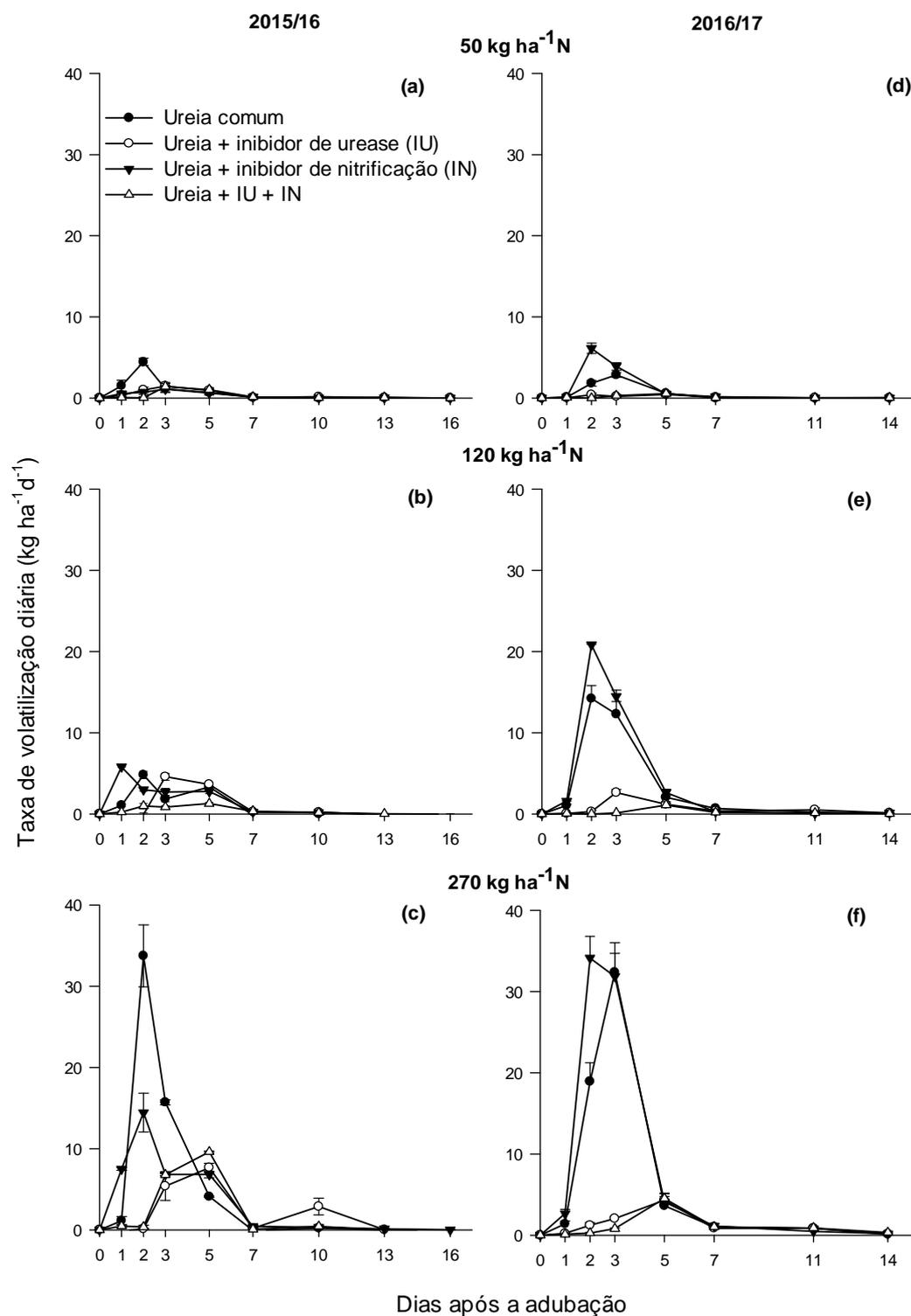


Figura 8. Taxa de volatilização diária em kg ha⁻¹d⁻¹ de N, nas diferentes fontes e diferentes doses, na safra 2015/2016 (a, b, c) e safra 2016/2017 (d, e, f). Barras verticais indicam o erro padrão das amostras ao nível de 5%.

A única exceção foi na dose de 120 kg ha^{-1} de N na safra 2015/16, quando a adição do inibidor de urease não diminuiu a volatilização de amônia (Figura 10b), fato para o qual não existe uma explicação plausível. Em média para as doses de N e nas duas safras (exceto a dose de 120 kg ha^{-1} em 2015/16), a adição do inibidor de urease à ureia resultou numa redução de mais de 70 % na volatilização de amônia.

Além da diminuição nas taxas de volatilização, de maneira geral o inibidor de urease promoveu um atraso de um ou dois dias na ocorrência dos picos de volatilização de amônia (Figura 10), o que pode ser importante, pois amplia a possibilidade de ocorrência de chuva, a qual promoveria uma incorporação da ureia ou do amônio no solo, o que seria favorável para reduzir as perdas de N por volatilização de amônia (Lara Cabezas et al., 1997).

Um aspecto a salientar é que a adição do inibidor de nitrificação à ureia comum não teve praticamente efeito nas perdas de N por volatilização de amônia, uma vez que a sua atuação ocorre na inibição da nitrificação do NH_4^+ à NO_3^- , podendo inclusive esse inibidor ter algum efeito em aumentar as perdas de N por volatilização de amônia uma vez que retarda a transformação do amônio, o qual pode ser convertido a amônia (NH_3) sob condições favoráveis como o pH alto (próximo aos grânulos de fertilizante) e umidade baixa o suficiente para que não ocorra a difusão deste íon no solo. Esse efeito do inibidor de nitrificação em aumentar as perdas de N por volatilização de amônia pode ser verificado na safra 2016/17, quando ocorreu um aumento médio de 23 % nas taxas de volatilização de NH_3 quando da adição do inibidor de nitrificação à ureia, na média das três doses de N (Figura 10 d, e, f).

6.3.3 Perdas acumuladas de N-NH₃

As perdas acumuladas de N por volatilização de amônia decorrentes da aplicação de ureia comum foram altas nos dois anos (Tabela 3 e Figura 11). Na safra 2015/16, as perdas acumuladas quando da aplicação de ureia comum foram similares para as doses de 50 e 120 kg ha^{-1} de N (17,4 e 12,4 % do N

aplicado, respectivamente) e foram ainda mais altas para a dose de 270 kg ha⁻¹ (22,4 % do N aplicado) (Tabela 3). Já na safra 2016/17, também no tratamento com ureia comum, a dose aplicada de 50 kg ha⁻¹ de N apresentou a menor perda acumulada de amônia (12,2 %), enquanto as doses de 120 e 270 kg ha⁻¹ de N apresentaram perdas mais altas (28,2 e 24,0 %, respectivamente) (Tabela 3).

Tabela 3. Perda acumulada de N por volatilização de amônia, em % do N aplicado em cobertura, nas diferentes fontes e doses.

Fonte de N	Dose de N (kg ha ⁻¹)			Média
	50	120	270	
	-----Perda Acumulada de N(%) -----			
	2015/2016 ¹			
Ureia comum	17,4	12,4	22,4	17,4 a
Ureia com inibidor de urease	8,6	11,4	11,6	10,5 bc
Ureia com inibidor de nitrificação	7,6	15,0	16,8	13,2 ab
Ureia com inibidor de urease e nitrificação	8,0	5,3	11,4	8,2 c
Média	10,4 b	11,0 b	15,6 a	
	2016/2017 ²			
Ureia comum	12,2 Bb	28,2 Ab	24,0 Ab	
Ureia com inibidor de urease	4,9 Ac	6,6 Ac	6,2 Ac	
Ureia com inibidor de nitrificação	23,2 Ca	36,0 Aa	30,0 Ba	
Ureia com inibidor de urease e nitrificação	3,9 Ac	3,4 Ac	5,9 Ac	

¹Tratamentos com médias seguidas por letras iguais na coluna e na linha não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5 %. ²Tratamentos com médias seguidas por letras iguais, maiúsculas na linha e minúscula na coluna, não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5 %.

A adição do inibidor de urease à ureia foi eficiente na redução de N-NH₃ tanto quando aplicado isoladamente quanto quando aplicado associado ao inibidor de nitrificação, em ambas as safras e nas três doses de N, determinando uma expressiva redução das perdas de N por volatilização de amônia (Tabela 3). Em relação à ureia comum, na safra 2015/16 e na média das doses de N e dos tratamentos onde o inibidor foi aplicado isoladamente ou associado ao inibidor de nitrificação, a adição do inibidor de urease resultou numa redução de 47 % da volatilização de amônia. Na safra 2016/17, o inibidor de urease reduziu de 60 a 82 % a volatilização de amônia entre doses aplicadas de N (Tabela 3).

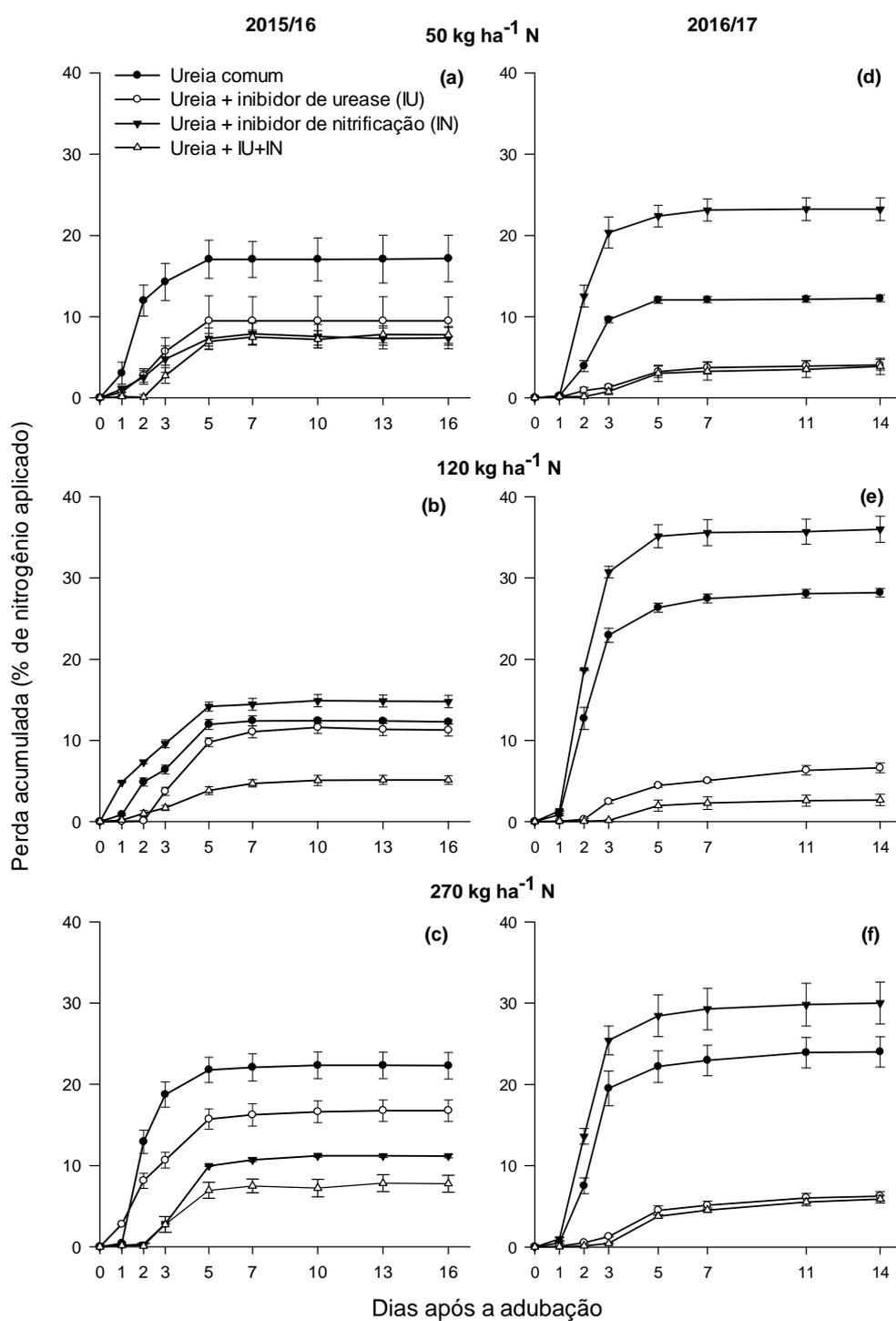


Figura 9. Perda acumulada em porcentagem do N aplicado, na safra 2015/2016 (a, b, c) e safra 2016/2017 (d, e, f). Barras verticais indicam o erro padrão das amostras.

Em relação à proporção de N aplicado, na safra 2015/16, com a adição do inibidor de urease à ureia as perdas de N-NH₃ reduziram de 15 a 20 % do N aplicado para valores, de maneira geral, próximos ou inferiores a 10% do N aplicado. Por sua vez, na safra 2016/17 quando ocorreram as condições meteorológicas mais favoráveis para a volatilização, as perdas reduziram de 25 a 35 % do N aplicado para valores inferiores a 5 % do N aplicado (Figura 11). Em estudos realizados por Viero et al. (2017) na mesma região agrícola e tipo de solo, verificou-se uma perda de N por volatilização de NH₃ da ureia comum de 13 a 25 % do N aplicado, a qual reduziu para aproximadamente 6 % do N aplicado. Em outro estudo, Viero et al. (2017) em condições favoráveis para a volatilização de amônia observaram redução das perdas em 59 e 64 % com a adição do inibidor de urease à ureia comum.

A Figura 11 na qual constam as perdas acumuladas de N-NH₃ ao longo do período amostral reforça os resultados de Fontoura e Bayer (2010), segundo os quais a grande proporção do N perdido por volatilização é perdida nos primeiros cinco dias após a aplicação do fertilizante. Na safra 2016/17, na qual as perdas de N-NH₃ foram ainda mais expressivas que na primeira safra, teve mais de 90 % da perda total de N por volatilização de amônia nesse curto período de cinco dias que sucederam a aplicação do fertilizante.

Em 2016/17, as maiores taxas diárias de perdas de amônia no tratamento com inibidor de nitrificação (Figura 10) se refletiram nas maiores perdas acumuladas (Tabela 3 e Figura 11). Como já comentado brevemente, considerando que o produto é eficiente na inibição da nitrificação isso faz com que o amônio permaneça por um maior período no solo e, havendo condições favoráveis a formação de amônia, como o pH alto ao redor dos grânulos e umidade baixa o suficiente para que não ocorra difusão para o interior do solo, pode ocorrer a volatilização. Em um estudo a campo, Silva (2016) observou maiores perdas de N por volatilização de amônia quando o inibidor de nitrificação (0,8 % DMPP) foi aplicado à ureia comum. A perda acumulada foi de 52 % do N aplicado, equivalente a 78,3 kg ha⁻¹ de N.

Entretanto, sabe-se que a inibição da nitrificação tem um grande potencial na redução das perdas por lixiviação no perfil do solo (Ruser e Schulz, 2015). Porém, como não se dispunha de uma técnica ou procedimento para uma adequada avaliação da lixiviação de nitrato no perfil do solo, realizou-se um estudo de incubação sob condições controladas em laboratório, visando obter evidências da eficiência do inibidor no retardamento do processo de nitrificação, cujos resultados serão discutidos na sequência.

6.3.4 Eficiência dos inibidores de urease e de nitrificação (estudo de incubação)

Como não foi possível avaliar a eficiência dos inibidores de urease e de nitrificação a campo sobre os processos de amonificação e nitrificação devido a variabilidade temporal e espacial dos teores de NH_4^+ e de NO_3^- no solo, se realizou um estudo de laboratório, no qual uma dose de N equivalente a 400 kg ha^{-1} das fontes de N foram aplicadas em amostras de solo da área experimental e incubadas por 29 dias.

A aplicação de ureia comum e ureia com inibidor de nitrificação aumentou o pH do solo de 5,5 para valores próximos de 7,5 logo no segundo dia após a aplicação do fertilizante, o que indica a solubilização deste e a sua amonificação ($\text{NH}_2 \rightarrow \text{NH}_4$) (Figura 12a). Por sua vez, a adição do inibidor de urease à ureia, isoladamente ou associado ao inibidor de nitrificação, apresentaram uma menor alteração do pH. Essa alteração do pH foi de até 1 unidade menor em comparação à ureia comum, indicando um retardamento da hidrólise da ureia e do processo de amonificação. Essa diferença nos valores de pH se restringiu aos dois primeiros dias consecutivos à aplicação de N, não ocorrendo um tamponamento do pH ao longo do período amostral, o qual retornou aos valores iniciais após 17 dias da aplicação do fertilizante.

O retardamento em dois ou três dias da amonificação quando da adição do inibidor de urease à ureia comum poder ser verificado na Figura 12b. No segundo dia após a aplicação dos fertilizantes, o solo sob aplicação de ureia comum apresentou um teor de 224 mg kg^{-1} de N-NH_4 (44,8 % do N aplicado),

enquanto que quando foi adicionado o inibidor de urease à ureia, o solo apresentou um teor de 109 mg kg^{-1} de N-NH_4 (21,8 % do N aplicado) (Figura 12b), evidenciando uma diminuição expressiva (>50%) nas taxas de amonificação, o que deve ser relacionada com a redução das perdas de amônia por volatilização verificadas a campo (Figuras 10 e 11).

A hidrólise da ureia no solo é diretamente dependente da atividade da enzima urease, sendo que quando esta enzima fica temporariamente com a sua atividade inibida, ocorre então uma redução na liberação do N nas formas amoniacais, o que é vantajoso no sentido em que reduz o substrato para a reação de formação de formas voláteis como a NH_3 . Em seu trabalho Sanz-Cobena et al. (2011) observaram que após um dia da aplicação da ureia, a atividade da urease foi menor nas parcelas tratadas com NBPT do que naquelas em que a ureia foi aplicada sem o inibidor, estas com taxas de $8 \mu\text{mol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ de NH_4^+ . Após três dias, não houve diferença significativa da atividade da urease entre tratamentos, mostrando que o inibidor de urease age principalmente, nestes primeiros dias, como também foi encontrado neste estudo.

Considerando que essa avaliação em laboratório foi realizada sem plantas em desenvolvimento, a diminuição temporal dos teores de NH_4^+ é acompanhada por um aumento nos teores de NO_3^- no solo, evidenciando o processo de nitrificação. Ao contrario do que ocorreu para o inibidor de urease, na Figura 12c não observou-se uma redução das taxas de formação de nitrato nos tratamentos que envolvem o inibidor de nitrificação nos dias que sucederam a aplicação dos fertilizantes e nem no restante do período amostral.

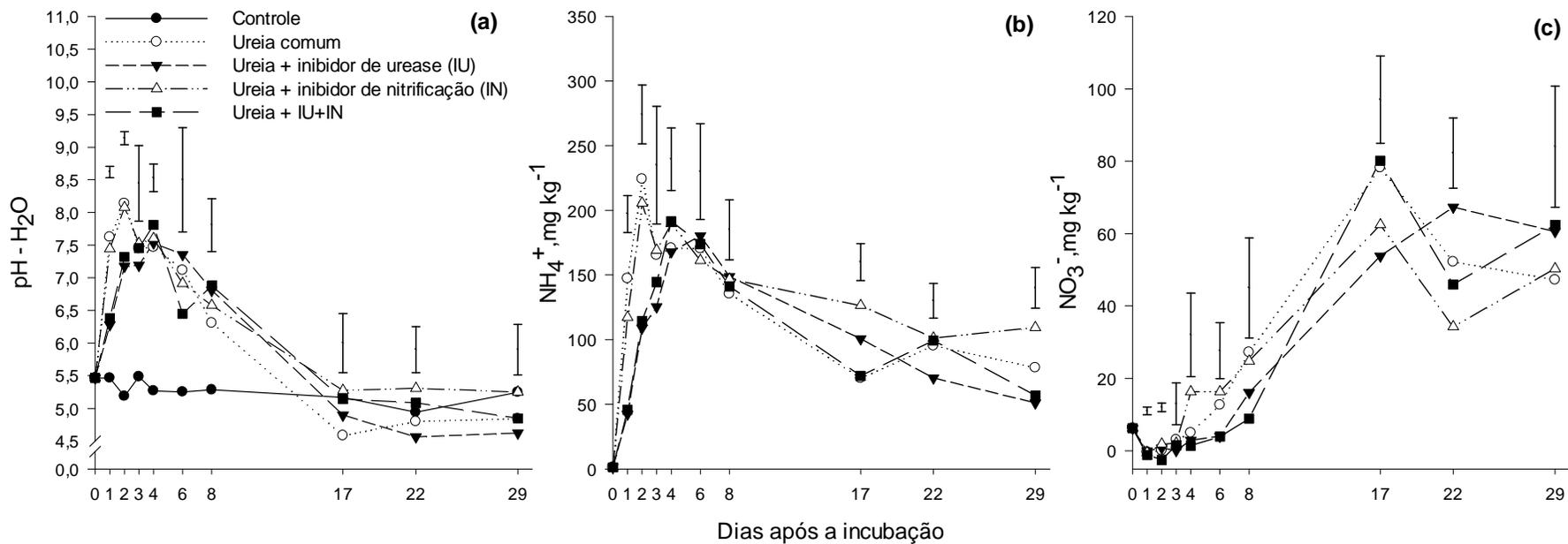


Figura 10. Variação do pH em função da aplicação de ureia e ureia com inibidor de urease no solo (a) concentração dos íons amônio (b) e nitrato (c) decorrente da aplicação de ureia comum, ureia+inibidor de urease (NBPT), ureia+inibidor de nitrificação (DCD), e ureia+NBPT+DCD a um Argissolo vermelho. Barras verticais indicam o erro padrão ($n=3$).

Chen et al.,(2014) em um estudo de incubação com dois inibidores de nitrificação (DCD e DMPP) encontrou no solo controle, concentrações de NH_4^+ baixas e que mudaram pouco ao longo do tempo. Já o tratamento com ureia mostrou uma liberação imediata de NH_4^+ com a maior concentração de 193 mg kg^{-1} de solo no primeiro dia, que declinou drasticamente para 55 mg kg^{-1} de solo no terceiro dia. As concentrações de NH_4^+ dos tratamentos ureia + IN (DCD e DMPP) diminuiram gradualmente, mantendo uma concentração de NH_4^+ maior e por mais tempo, assim como ocorreu nos dois primeiros dias da incubação deste estudo (Figura 12).

Neste mesmo trabalho, Chen et al.,(2014) analisaram as concentrações de NO_3^- nos mesmos tratamentos, onde encontrou no solo controle uma concentração de 107 mg kg^{-1} de solo que permaneceu relativamente estável, para o tratamento com ureia, a maior concentração foi detectada no 7º dia e, em seguida, permaneceu em aproximadamente 350 mg kg^{-1} de solo e para os tratamentos com ureia + IN (DCD e DMPP), a concentração de NO_3^- aumentou com um atraso de 24 dias.

A fim de visualizar de forma mais clara a eficiência dos inibidores de urease e de nitrificação, calculou-se as intensidades de NH_4^+ e de NO_3^- no solo, respectivamente. A “intensidade” desses íons representa a média ponderada dos seus teores no solo no período amostral (Tabela 4). Verifica-se na Tabela 4 que a adição do inibidor de urease reduziu a intensidade de NH_4^+ , evidenciando a eficiência deste inibidor em reduzir a hidrólise da ureia e a formação do amônio no solo. Por sua vez, não há evidências nos resultados de que o inibidor de nitrificação tenha sido eficiente em inibir a nitrificação, como se pode concluir a partir das similares intensidades de NO_3^- para os tratamentos com o sem inibidor de nitrificação.

Tabela 4. Intensidade do íon amônio e nitrato ($\text{mg kg}^{-1}\text{d}^{-1}$) durante os 29 dias de incubação do solo de Eldorado do Sul.

Intensidade de NH_4^+ ($\text{mg ha}^{-1}\text{d}^{-1}$)	
Tratamento	Eladorado do Sul - RS
Ureia comum	108,2 ab
Ureia com inibidor de urease	103,1 b
Ureia com inibidor de nitrificação	128,3 a
Ureia com inibidor de urease e nitrificação	103,3 b
Intensidade de NO_3^- ($\text{mg ha}^{-1}\text{d}^{-1}$)	
Ureia comum	41,7 ^{ns}
Ureia com inibidor de urease	37,7
Ureia com inibidor de nitrificação	35,0
Ureia com inibidor de urease e nitrificação	38,4

Tratamentos com médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5 %. ^{ns} Não significativo.

6.3.5 Rendimento de grãos

Em ambas as safras, de maneira geral, o aumento da dose de N determinou um aumento no rendimento de grãos (Tabela 5), independente da fonte de N utilizada. As fontes de N tiveram efeito no rendimento de grãos apenas na safra 2015/16, na qual a adição de inibidor de urease à ureia determinou aumento no rendimento de grãos, independente se foi aplicado isoladamente ou associado ao inibidor de nitrificação (Tabela 5). O aumento no rendimento de grãos foi de aproximadamente 12%, o que significa, mais de 1,0 Mg ha^{-1} de grãos em relação aos tratamentos sem a adição do inibidor de urease.

Esse efeito do inibidor de urease aumentando o rendimento de grãos do milho foi verificado também por Frazão et al. (2014) no sistema de preparo convencional, onde a ureia comum resultou num rendimento aproximadamente 10% inferior do que quando o NBPT foi adicionado à ureia. Silva et al., (2011) também encontrou incremento no rendimento do milho com o uso da ureia com a adição de NBPT, o rendimento de grãos aumentou com o aumento nos níveis de N aplicados até a dose de N de 116 kg ha^{-1} , com o uso da ureia comum. No entanto, em taxas mais elevadas de N aplicado, a ureia tratada com NBPT proporcionou maior rendimento de grãos de milho.

Tabela 5. Rendimento de grãos de milho em função de fontes e doses de N, em dois anos agrícolas, em Eldorado do Sul, RS.

Fonte de N ⁽¹⁾	Dose de N (kg ha ⁻¹)			Média
	50	120	270	
	-----Rendimento de grãos (Mg ha ⁻¹)-----			
	Ano Agrícola 2015/2016			
Ureia comum	A 9,20 b	BC 9,01 b	B 11,06 a	9,75
Ureia + IU	A 10,05 b	A 10,86 b	AB 12,27 a	11,06
Ureia + IN	A 9,54 b	C 8,36 b	B 11,53 a	9,81
Ureia + IU + IN	A 9,90 b	AB 9,96 b	A 13,74 a	11,20
Média	9,67	9,55	12,15	
CV (%) ⁽²⁾	8,54			
	Ano Agrícola 2016/2017			
Ureia comum	B 14,00 b	A 16,74 a	A 16,79 a	15,84
Ureia + IU	A 15,82 b	A 16,27 ab	A 17,63 a	16,57
Ureia + IN	A 15,91 a	A 16,11 a	A 16,70 a	16,24
Ureia + IU + IN	A 15,83 b	A 17,11 ab	A 18,02 a	16,98
Média	15,39	16,55	17,28	
CV (%) ⁽²⁾	5,66			

⁽¹⁾IU: Inibidor de urease; IN: inibidor de nitrificação. ⁽²⁾ Coeficiente de variação. Tratamentos seguidos por letras iguais maiúsculas na coluna comparam fontes de N e letras minúsculas na linha comparam doses de N, pelo teste de Tukey ao nível de 5 %.

6.3.6 Eficiência agrônômica de uso do N (EAN)

As menores perdas de N por volatilização de amônia (Tabela 3 e Figura 10 e 11) nas duas safras e os maiores rendimentos de milho na safra 2015/16 (Tabela 5) com a adição de inibidor de urease à ureia não foi suficiente para que essa eficiência do inibidor de urease se expressasse em maior eficiência agrônômica (kg de grãos kg⁻¹ de N aplicado) (Tabela 6).

O único fator que influenciou a eficiência agrônômica de uso do N (EAN) foram as doses de N, onde a EAN foi menor para as maiores doses de N (Tabela 6), o que era esperado considerando que o aumento do rendimento com as doses de N não é linear, mas sim segue, normalmente, uma função quadrática, onde aumentos em produtividade ocorrem nas menores doses de fertilizantes, que diminuem na medida que as doses vão se tornando cada vez maiores. Esse comportamento da EAN é amplamente reportado na literatura e deve-se ao fato de que EAN diminui gradativamente a medida que a cultura se

aproxima do seu potencial produtivo máximo. Farinelli et al. (2010) concluíram que a EAN diminui entre as doses de 40 e 160 kg ha⁻¹ de N na cultura do milho.

Tabela 6. Eficiência agrônômica de uso do N (em kg grãos por kg N aplicado) na cultura do milho, em dois anos agrícolas, em Eldorado do Sul, RS.

Fonte de N ⁽¹⁾	Dose de N (kg ha ⁻¹)			Média
	50	120	270	
	-----Eficiência agrônômica (kg kg ⁻¹)-----			
	Ano Agrícola 2015/2016			
Ureia comum	77,39	40,01	26,84	48,08 B
Ureia + IU	88,02	52,29	30,86	57,06 A
Ureia + IN	81,58	35,66	28,41	48,55 AB
Ureia + IU + IN	86,11	46,31	35,76	56,06 AB
Média	83,28 a	43,57 b	30,46 c	
CV (%) ⁽²⁾	15,15			
	Ano Agrícola 2016/2017			
Ureia comum	B 27,78 ab	A 33,03 a	A 16,71 b	25,84
Ureia + IU	A 50,43 a	A 29,92 b	A 17,62 b	32,65
Ureia + IN	A 51,66 a	A 28,87 b	A 16,40 b	32,31
Ureia + IU + IN	A 50,57 a	A 35,49 ab	A 20,80 b	35,62
Média	45,11	31,83	17,88	
CV (%) ⁽²⁾	29,79			

⁽¹⁾IU: Inibidor de urease; IN: inibidor de nitrificação. ⁽²⁾ Coeficiente de variação. Tratamentos seguidos por letras maiúsculas na coluna comparam fontes de N e letras minúsculas na linha comparam doses de N, pelo teste de Tukey ao nível de 5 %.

A EAN obtida foi baixa, ou seja, o solo apresentou baixa resposta a aplicação de N, o que pode ser explicado, considerando que a área cultivada possui um relativo acúmulo de matéria orgânica e nitrogênio no sistema solo (Tabela 1). É ISSO MESMO? NA SAFRA 1 e na 2 ??

Mota et al. (2015) em estudo da EAN na cultura do milho encontrou resultados de EAN de: 42, 41, 39 e 38 kg kg⁻¹, das fontes ureia comum, ureia com inibidor de urease, ureia com inibidor de nitrificação e nitrato de amônio, respectivamente. No entanto, as fontes não apresentaram diferença entre si, assim como ocorreu neste estudo. Silva et al., (2011) também estudando a EAN na cultura do milho encontrou diferença significativa entre a ureia comum e a ureia tratada com NBPT somente na dose de 180 kg ha⁻¹, sendo a maior EAN na ureia com NBPT.

6.4. CONCLUSÕES

A adição do inibidor de urease NBPT à ureia, isoladamente ou associado ao inibidor de nitrificação DCD, foi eficiente na redução das perdas de N por volatilização de amônia da ureia aplicada na cultura do milho cultivada em plantio direto num Argissolo vermelho.

A eficiência do inibidor de urease à campo foi confirmada em estudo de laboratório como evidenciado pela menor elevação dos valores de pH e menor elevação dos teores de NH_4^+ do que quando da aplicação de ureia comum.

Em uma das safras, a adição do inibidor de urease à ureia promoveu aumento da eficiência agronômica do N e do rendimento de grãos de milho.

O estudo realizado sob condições controladas não forneceu evidências de que o inibidor de nitrificação seja eficiente. Esses resultados são reforçados pelo não efeito do inibidor na eficiência do uso do N e no rendimento de grãos de milho.

REFERÊNCIAS

ABALOS, D. et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification on crop productivity and nitrogen use efficiency. **Agriculture, ecosystems and environment**, n. 189, p. 136-144, 2014.

AHMED M. et al. Mitigation of ammonia volatilization with application of urease and nitrification inhibitors from summer maize at the Loess Plateau. **Plant soil environment**, Yangling, P.R. China, v. 64, n. 4, p. 164-172, 2018.

AITA, C. et al. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto. I – Dinâmica do nitrogênio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 4, p. 739-749, 2004.

AZEEM, B. et al. Review on materials and methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of controlled release**, Amsterdam, v. 181, p. 11-21, 2014.

BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R.; FAGERIA, N, K. Soil-plant interaction on nutrient efficiency in plants: an overview. In: Baligar, R. V.; Duncan, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic, 1990. p. 351-373.

BARTH, G. **Inibidores de urease e de nitrificação na eficiência de uso de adubos nitrogenados**. 2009. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. **Dinâmica e função da matéria orgânica**. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.

BLOUIN, M. G.; RINDT, W. D. **Method of making sulfur-coated fertilizer pellet having a controlled dissolution rate**. US Pat. 3295950, 01 mar. 1967.

BODDEY, R.M. et al. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero- till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Oxford, v. 16, p. 784-795, 2010.

BOLETIM AGROMETEOROLÓGICO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL AGRONÔMICA DA UFRGS - Série histórica 1970 - 2012. Porto Alegre: UFRGS/Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia/UFRGS, 2013.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. O uso do inibidor de urease para aumentar a eficiência da urea. In: SIMPÓSIO PARA A OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA, Piracicaba, 2007. **Anais...** Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2007, v.1, p. 2–19.

CANTARELLA, H. et al. Perdas de N por volatilização da amônia e resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada em sistema de colheita de cana sem queima prévia. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 7., 1999. **Anais...** Londrina, 1999.

CANTARELLA, H. et al. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugar cane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n.4, p. 397-401, 2008.

CHEN, Q. et al. Comparative effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) and dicyandiamide (DCD) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in a vegetable soil. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlin, v. 99, p. 477-487, 2014.

CHIEN, S.H. et al. Review of maleic–itaconic acid copolymer purported as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, p. 423–430, 2014.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: safra 2017/2018, sétimo levantamento**, Brasília: Conab, v. 5, n.7, abr. 2018. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola.

DA ROS, C. O.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Volatilização de amônia com aplicação de uréia na superfície do solo, no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.4, p.799-805, 2005.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA. **Normais climatológicas Passo Fundo - RS (1961 - 1990)**. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/app/principal/normais.php>>. Acesso em: mar. 2018.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

EPAGRI – EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. **Custos de produção (Agosto de 2017 – Milho média tecnologia)**. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.epagri.sc.gov.br/?page_id=2696> Acesso em: jul. 2018.

FARINELLI, R.; LEMOS, L.B. Produtividade e eficiência agrônômica do milho em função da adubação nitrogenada e manejos do solo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.9, n.2, p.135-146, 2010.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, Lavras, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the south-central region of the State of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.5, p.1677-1684, 2010.

FRANCHINI, J. C. et al. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p.18-29, 2007.

FRANCHINI, J. C. et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

FRANCHINI, J. C. et al. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).

FRANCHINI, J. C. et al. **Contribuição de sistemas de manejo do solo para a produção sustentável da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 12 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 58).

FRAZÃO, J. J. et al. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.12, p.1262–1267, 2014.

GIACOMINI, S. J. et al. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto. II - Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 751-762, 2004.

GUELFY, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agrônomicas**, n. 157, p. 1-14, mar. 2017.

HEFFER, P.; GRUÈRE, A.; ROBERTS, T. **Assessment of fertilizer use by crop at the global level**. Paris: International Fertilizer Association; International Plant Nutrition Institute, 2017.

HOLCOMB, J.C., et al. Effect of irrigation rate on ammonia volatilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, n. 6, p. 2341-2347, 2011.

IPNI – **INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE**. Disponível em: <<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132#evolucao>>. Acesso em: mar. 2018.

IAPAR – **INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ**. **Boletim Técnico 89**: avaliação estadual de cultivares de milho: safra 2016/2017. Londrina, 2017.

KISSEL, D.E.; CABRERA, M.L.; FERGUSON, R.B. Reactions of ammonia and urea hydrolysis products with soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1793–1796, 1988.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDÖRFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.3, p.481-487, 1997.

LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O. Eficiência de um coletor semiaberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da uréia aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, n.3, p.345-352, 1990.

LARA CABEZAS, W. A. R. et al. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema de plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.363-376, 2000.

MIOZZO, L. C. **Época de semeadura e fertilizantes estabilizados como estratégias para aumentar a eficiência de uso de nitrogênio em milho**. 2017. 103 f. (Mestrado em Fitotecnia), Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.

MOTA, M.R. et al. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p. 512-522, 2015.

NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of controlled release**, Amsterdam, n. 225, p. 09-120, 2016.

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

PADILHA, F.A. et al. OLIVEIRA, A. C. Produtividade de híbridos de milho sob dois níveis de tecnologia na região central de Minas Gerais. **Revista brasileira de milho e sorgo**, v.14, n.2, p. 207-218, 2015.

PAN, B. et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Austrália, 2016. 232:283-289.

PAULSON, K. N.; KURTZ, L. T. Locus of urease activity in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.33, n.6, p.897-901, 1969.

PEDROSA, A. W. **Eficiência da adubação nitrogenada no consórcio entre cafeeiro**. 2013. 73 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2013.

PEREIRA, H.S. et al. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1685-1694, 2009.

PRAKASA RAO, E. V. S.; PUTTANNA, K. Nitrification and ammonia volatilisation losses from urea and dicyandiamide-treated urea in a sandy loam soil. **Plant and soil**, The Hague, v. 97, p. 201-206, 1987.

RITCHIE, S.W., et al. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University, 1993. 26 p.

ROCHETTE, P. et al. Banding of urea increased ammonia volatilization in a dry acidic soil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 38, p. 1383-90, 2009.

RODRIGUES, M. B.; KIEHL, J. C. Volatilização de amônia após emprego de uréia em diferentes doses e modos de aplicação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.1, p.37-43, 1986.

ROJAS, C.A.L. et al. Volatilização de Amônia da Ureia Alterada por Sistemas de Preparo de Solo e Plantas de Cobertura Invernais no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 261-270, 2012.

RUSER, R.; SCHULZ, R. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils - a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Stuttgart, v. 178, p. 171-188, 2015.

SANGOI, L. et al. Volatilização de NNH₃ em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 687-692, 2003.

SANGOI, L. et al. Perfilhamento como característica mitigadora dos prejuízos ocasionados ao milho pela desfolha do colmo principal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 11, p. 1605-1612, 2012.

SANZ-COBENA, A. et al. Effect of water addition and the urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 45, n. 8, p. 1517-1524, 2011.

SCIVITTARO, W. B. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.6, p.1283-1289, 2010.

SERPA, M. S. et al. Densidade de plantas em híbridos de milho semeados no final do inverno em ambientes irrigados e de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.11, p.541-549, 2012.

SILVA, A. L. **Eficiência agrônômica da ureia estabilizada com inibidores de urease e nitrificação na cultura do milho**. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

SILVA, A.G.B. et al. Urease Inhibitor NBPT on Ammonia Volatilization and Crop Productivity: A Meta-Analysis. **Agronomy Journal**, Madison , v. 109, n. 1, p. 1, 2017.

SILVA, D.R.G. et al. Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT-treated urea. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, p. 516–523, 2011.

SOARES, J.R.; CANTARELLA, H.; MENEGALE, M.L.C. Ammonia volatilization losses of surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 52, p. 82 – 89, 2012.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture; Natural Resources Conservation Service, 2014.

TASCA, F.A. et al. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 493–502, 2011.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS. 1995. 174 p.

TIMILSENA, Y. P. et al. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the science of food and agriculture**, London, v. 95, p. 1131- 1142, 2014.

TRENKEL, M. E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. 167 p.

VIEIRA, F. C. et al. A Long-term acidification of a Brazilian Acrisol as affected by no till cropping systems and nitrogen fertiliser. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.46, n.1, p.17-26, 2008.

VIERO, F. et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1515-1525, 2014.

VIERO, F. et al. Urease inhibitor and irrigation management to mitigate ammonia volatilization from urea in no-till corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, [art.] e0160567, 2017.

VITTI, G. C. et al. Influência da mistura de sulfato de amônio com ureia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p.663-671, 2002.

WATSON, C. J. et al. Rate and mode of application of the urease inhibitor n-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil use and management**, Oxford, v. 24, p. 246-253, 2008.

YAMAMOTO, C. F. et al. Slow release fertilizer based on urea/urea-formaldehyde polymer nanocomposites. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 287, p. 390-397, 2016.

YANG M. et al. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. **Scientific Reports**, London, v. 6, p. 22075, 2016.

ZAVASCHI, E. et al. Ammonia volatilization and yield components after application of polymer-coated urea to maize. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1200-1206, 2014.