

## Comissão 3.2 - Corretivos e fertilizantes

# VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA ORIUNDA DE UREIA PASTILHADA COM MICRONUTRIENTES EM AMBIENTE CONTROLADO<sup>(1)</sup>

Juliano Bahiense Stafanato<sup>(2)</sup>, Rosimar de Souza Goulart<sup>(3)</sup>, Everaldo Zonta<sup>(4)</sup>, Eduardo Lima<sup>(5)</sup>, Nelson Mazur<sup>(5)</sup>, Carlos Guerra Pereira<sup>(6)</sup> & Heraldo Namorato de Souza<sup>(6)</sup>

### RESUMO

Novas tecnologias com o intuito de minimizar as perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização devem ser desenvolvidas para aumentar a eficiência de uso do N-ureia. A incorporação de boro e cobre na ureia pode reduzir esses efeitos por meio da inibição da atividade da urease. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, onde foram aplicados diferentes fertilizantes nitrogenados (ureia pastilhada com e sem boro e cobre, sulfato de amônio, ureia com inibidor da urease NBPT, ureia granulada e ureia revestida com boro e cobre) na superfície de um Planossolo Háplico contido em bandejas (0,1 m<sup>2</sup> de área e 10 cm de profundidade), em dose equivalente a 200 kg ha<sup>-1</sup> de N. Foram avaliadas as perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização durante 18 dias, com o auxílio de um coletor semiaberto. A adição de cobre e boro no processo de pastilhamento da ureia reduziu as perdas de amônia por volatilização em até 54 %, quando comparado com a ureia granulada comercial, comprovando ser eficiente contra as perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização.

**Termos para indexação:** perdas de N-NH<sub>3</sub>, fertilizantes pastilhados, urease.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Recebido para publicação em 4 de abril de 2012 e aprovado em 20 de março de 2013.

<sup>(2)</sup> Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - CPGA-CS, Departamento de Solos (DS), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ. BR 465, km 7. CEP 23.851-970 Seropédica (RJ). E-mail: jstafanato@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Mestre em Ciência do Solo - CPGA-CS, DS/UFRRJ. E-mail: rs.goulart@hotmail.com

<sup>(4)</sup> Professor Adjunto, DS/UFRRJ. Bolsista de Produtividade do CNPq. E-mail: ezonta@ufrj.br

<sup>(5)</sup> Professor Adjunto, DS/UFRRJ. E-mail: edulima@ufrj.br; nelmazur@ufrj.br

<sup>(6)</sup> Pesquisador da PETROBRAS/CENPES/PDAB/TP/COFERT. Av. Jequitibá, 950, Radial 6, sala 670, Ilha do Fundão. CEP 21.941-598 Rio de Janeiro (RJ). E-mail: cgp.gorceix@petrobras.com.br; heraldo.ns@petrobras.com.br

### SUMMARY: AMMONIA VOLATILIZATION FROM PELLETIZED UREA WITH MICRONUTRIENTS IN A CONTROLLED ENVIRONMENT

*New technologies that enable a reduction in  $NH_3$ -N volatilization losses should be developed to increase the N use efficiency of urea. The incorporation of boron and copper into urea can reduce these effects by inhibiting urease activity. The experiment was conducted in a greenhouse, testing the application of different N fertilizers (urea pellets with and without boron and copper, ammonium sulfate, urea with urease inhibitor NBPT, granulated urea and urea coated with boron and copper) to the surface of a Haplic Planosol in trays (area 0.1 m<sup>2</sup>, depth 10 cm), at a rate of 200 kg ha<sup>-1</sup> N. The  $NH_3$ -N volatilization losses were assessed for 18 days, using a semi-open gas collector. The inclusion of copper and boron in the process of pelletizing urea reduced losses by up to 54 %, compared with the commercial granulated urea, proving the effective minimization of  $NH_3$ -N volatilization losses.*

*Index terms: N-NH<sub>3</sub> loss, pelletized fertilizers, urease.*

## INTRODUÇÃO

O grande desafio do setor agrícola nas próximas décadas é de aumentar a produção de alimentos, uma vez que sua demanda dobrará nos próximos 50 anos, em virtude de estimativas que em 2050 a população mundial alcance aproximadamente 9,3 bilhões de pessoas. Dessa forma, a produtividade de cereais como o milho, arroz e trigo terá que aumentar entre 50 e 70 %. O Brasil é um dos poucos países com grandes possibilidades de participar desse processo, pois possui tecnologias sustentáveis de produção para atingir incrementos de produtividade em muitas culturas, além de possuir 550 milhões de hectares de áreas agrícolas potencialmente agricultáveis (Lopes & Bastos, 2007).

Considerando então a necessidade de se aumentar a produção de alimentos, alcançar maior eficiência no uso do N-ureia é um fator que se torna de extrema importância (Boaretto et al., 2007). Em razão de esse fertilizante apresentar altas perdas de nitrogênio (N) por volatilização da amônia, surge a necessidade de se realizarem novas pesquisas em desenvolvimento tecnológico, com objetivo de obter fertilizantes nitrogenados mais eficientes em fornecer N.

A adubação nitrogenada para as culturas de grãos no Brasil é fundamentada praticamente no uso do fertilizante ureia, sendo esse produto oriundo predominantemente de importações (74 %), o que representou no ano de 2010 em aproximadamente 51 % do fertilizante nitrogenado utilizado no País (ANDA, 2010). Dentre as vantagens no uso desse fertilizante em relação às demais fontes nitrogenadas, destaca-se principalmente sua alta concentração de N (44 a 46 %), resultando consequentemente em menor custo tanto no transporte quanto na aplicação (Kiehl, 1989). Entretanto, esse fertilizante apresenta como desvantagem grandes perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização, que podem comprometer sua eficiência. Essas perdas ocorrem uma vez que esse fertilizante pode ser rapidamente hidrolisado (dois a três dias) pela

ação da enzima urease, enzima essa produzida por microrganismos do solo e por restos vegetais e animais. Em razão das características da urease, fatores que influenciam as atividades dos microrganismos do solo também influenciam a hidrólise da ureia, promovendo grandes variações na sua taxa para diferentes tipos de solos (Reynolds & Wolf, 1987).

Nos últimos anos, novas tecnologias têm sido desenvolvidas com o intuito de minimizar as perdas de N-ureia por volatilização, como o uso de inibidores da urease (principalmente o NBPT) e a incorporação e, ou, revestimento da ureia com micronutrientes, especialmente cobre (Cu) e boro (B) e de polímeros que interferem na hidrólise e, ou, solubilização da ureia no solo (Vitti et al., 2002; Cantarella, 2007a). A utilização desses produtos pode ocasionar diminuição da volatilização em até 80 %, sendo essas tecnologias as principais comercializadas para as culturas de grãos, cana-de-açúcar e fibras (Vitti et al., 2002; Cantarella, 2007a).

Compostos com potencial de atuar como inibidores da urease têm sido testados com a finalidade de retardar a hidrólise da ureia e consequentemente diminuir as perdas de N por volatilização. Diversos estudos revelaram que alguns micronutrientes podem inibir a atividade da urease no solo (Zhixin & Shuqing, 2001; Wyszowska et al., 2005; Shen et al., 2006; Gabrovska & Godjevargova, 2009; Lijun et al., 2009), diminuindo então a hidrólise da ureia, fazendo com que provavelmente a eficiência no uso do N seja aumentada por consequência da diminuição das perdas, principalmente por volatilização da amônia. Gong et al. (1997), avaliando a atividade máxima da urease no solo, observaram que essa atividade era máxima na ausência de Cu e que posteriormente a atividade da urease diminuiu de acordo com adições crescentes desse elemento, o que foi atribuído ao declínio da síntese da enzima urease, em razão de diminuição da população de microrganismos.

A granulometria dos fertilizantes sólidos está diretamente relacionada com o seu tamanho e a forma

de suas partículas. De acordo com Alcarde et al. (1998), a influência do tamanho das partículas dos fertilizantes baseia-se no fato de que a subdivisão de um material aumenta sua superfície de exposição por unidade de massa. Em virtude disso, os fenômenos que dependem do contato, como a velocidade de dissolução, absorção de umidade atmosférica ou higroscopicidade, são maximizados ou reduzidos em razão do seu tamanho. Com isso, o processo de pastilhamento de ureia pode influenciar positivamente ou negativamente nessas características.

Este estudo objetivou avaliar o aumento da eficiência da adubação nitrogenada, quando houve incorporação dos micronutrientes Cu e B, em diferentes concentrações, na ureia na forma pastilhada.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no município de Seropédica, RJ, em casa de vegetação localizada no Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), no período de 12/07/2011 a 30/07/2011, totalizando 18 dias de avaliação.

O solo utilizado foi proveniente de um Planossolo Háptico (Embrapa, 2006), textura arenosa, coletado da camada superficial de 0-20 cm, antiga rodovia RJ-SP, km 47, UFRRJ. O solo foi posteriormente seco, destorroado, peneirado (malha de 2 mm) e homogeneizado. As análises químicas e granulométricas (Quadros 1 e 2) foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Solos/UFRRJ, segundo métodos propostos por Embrapa (1997).

O solo então foi submetido à calagem, a fim de elevar o pH a 6,5, com intuito de maximizar a ação da enzima urease e, conseqüentemente, as perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização, segundo incubação proposta por Stafanato (2009). Posteriormente, esse foi alocado até a superfície de bandejas plásticas com 0,1 m<sup>2</sup> de área e 10 cm de profundidade, constituindo as unidades experimentais.

O experimento consistiu de 27 unidades experimentais, considerando os nove fertilizantes utilizados, uma dose de N, um tipo de solo, com três repetições, sendo adotado o delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos consistiram dos seguintes fatores: ureia pastilhada com diferentes concentrações

## Quadro 2. Análise granulométrica dos solos

Solo	Argila		Areia		
	Natural	Total	Total	Fina	Silte
	g kg <sup>-1</sup>				
Planossolo Háptico	30	70	920	210	10

dos micronutrientes Cu e B, obtendo-se os produtos ureia<sub>Cu+B-1</sub>, ureia<sub>Cu+B-2</sub> e ureia<sub>Cu+B-3</sub> (Quadro 3). Esses produtos foram comparados com os tratamentos testemunhas ureia pastilhada (avalia o efeito do tamanho da pastilha), ureia pastilhada com sulfato de cálcio (objetiva isolar o efeito do íon sulfato acompanhante do micronutriente Cu - sulfato de cobre), ureia granulada, ureia comercial contendo inibidor da urease (NBPT), ureia comercial revestida com os micronutrientes Cu e B e sulfato de amônio (Quadro 3). Os fertilizantes utilizados foram produzidos no CENPES/Petrobras. O processo consistiu no pastilhamento de ureia com micronutrientes.

Adicionou-se uma lâmina de água com auxílio de uma proveta graduada equivalente a 18 mm, para que o solo contido nas bandejas alcançasse 70 % da sua capacidade de campo, estimulando assim a produção de urease pelo solo. Posteriormente, os fertilizantes nitrogenados foram aplicados manualmente de maneira uniforme na superfície do solo contido nas bandejas, em dose equivalente a 200 kg ha<sup>-1</sup> de N, e, imediatamente após, as câmaras coletoras de N-NH<sub>3</sub> (Figura 1) foram colocadas na superfície do solo. Utilizaram-se duas câmaras por bandeja, que foram movimentadas diariamente após cada coleta de forma a percorrer toda a área da bandeja. Tal procedimento objetivou reduzir as variações comumente observadas em ensaios de determinação de N-NH<sub>3</sub> volatilizado do solo.

Em razão de pesquisas realizadas no Brasil indicarem que, para a maioria das situações, a máxima eficiência do inibidor da urease NBPT varia de três a sete dias e que após esse período o NBPT perde gradativamente o seu efeito inibitório (Cantarella, 2007b), optou-se em conduzir as coletas de volatilização por um período maior, com o intuito de observar melhor a dinâmica de perdas de N provenientes da ureia pastilhada com Cu e B.

Dessa forma, as coletas do volatilizado foram realizadas até o 18º dia, de maneira intercalada, da seguinte forma: em intervalos de 24 h até o 6º dia; e,

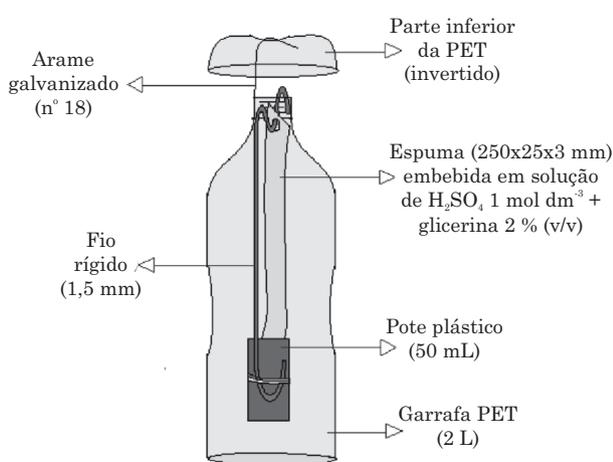
## Quadro 1. Caracterização química do solo utilizado

Solo	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al	Al <sup>3+</sup>	S	T	pH (H <sub>2</sub> O)	Corg	P	K
	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>								g kg <sup>-1</sup>		mg L <sup>-1</sup>
Planossolo Háptico	0,016	1,2	0,3	2,5	0,50	1,59	4,09	5,5	1,02	3	30

**Quadro 3. Caracterização dos fertilizantes quanto às suas concentrações de N e de micronutrientes**

Fertilizante (tratamento)	Tecnologia	Composição	Proporção N: Cu: B
			%
Ureia <sub>Cu+B-1</sub>	Pastilhada	Ureia/CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O/ H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	38,8: 0,5: 2,0
Ureia <sub>Cu+B-2</sub>	Pastilhada	Ureia/CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O/ H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	40,08: 2,0: 0,5
Ureia <sub>Cu+B-3</sub>	Pastilhada	Ureia/CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O/ H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	42,78: 0,5: 0,5
Ureia + Sulfato de Cálcio	Pastilhada	Ureia/CaSO <sub>4</sub>	38,76: 0,0: 0,0
Ureia Pastilhada	Pastilhada	Ureia	45,00: 0,0: 0,0
Ureia Granulada <sup>(1)</sup>	Granulada	Ureia	45,00: 0,0: 0,0
Ureia + NBPT <sup>(1)</sup>	Revestida	Ureia/NBPT	45,00: 0,0: 0,0
UreiaCuB <sup>(1)</sup>	Revestida	Ureia/Cu/B	44,08:0,06: 0,3
Sulfato de Amônio <sup>(1)</sup>	Perolada	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21,00: 0,0: 0,0

<sup>(1)</sup> Fertilizantes comerciais.



**Figura 1. Esquema da câmara coletora de N-NH<sub>3</sub> semiaberto livre estático "SALE" (Araújo et al., 2009).**

após, as determinações foram realizadas no 8<sup>o</sup>, 10<sup>o</sup>, 14<sup>o</sup> e 18<sup>o</sup> dias, após aplicação dos fertilizantes; isso permitiu avaliar a dinâmica das perdas de amônia ao longo do tempo. Durante todo o período experimental, a umidade do solo foi mantida entre 50 e 70 % de retenção de água no solo. A análise da amônia volatilizada foi realizada, segundo Araújo et al. (2009).

A análise dos dados foi realizada, utilizando-se o programa SAEG 9.1. Os dados foram submetidos às pressuposições de normalidade e homogeneidade dos erros, usando, respectivamente, os testes de Lilliefors e Bartlett. A análise variância foi efetuada por meio de teste F e o teste de comparação de médias por teste de Scott-Knott a 5 %.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudos têm demonstrado que a atividade da urease nos solos aumenta com a elevação da temperatura de 10 para 40 °C (Lai & Tabatabai, 1992)

e que a hidrólise da ureia é potencializada com a manutenção do conteúdo de água no solo até próximo da sua capacidade de campo (Antil et al., 1993). De acordo com Cantarella (2007b), as perdas por volatilização de NH<sub>3</sub> são favorecidas nas condições do verão brasileiro, em que predominam altas temperaturas e umidade.

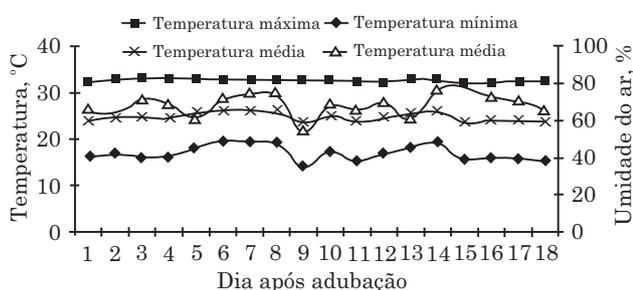
Com isso, verifica-se que a umidade do ar e a temperatura no interior da casa de vegetação (Figura 2) influenciaram positivamente nas perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização. Nesse local, a temperatura máxima média foi de aproximadamente 32,5 °C e umidade média de 70 %, clima esse então favorável à hidrólise da ureia e às perdas por volatilização da amônia, reflexo da forte corrente de ar ocasionada pelo uso de exaustores e das altas temperaturas. Em razão de o solo utilizado apresentar baixa capacidade de retenção de água (textura arenosa), bem como a casa de vegetação estar associada às altas taxas de evaporação, houve favorecimento também do fluxo de água e, conseqüentemente, de N-NH<sub>3</sub> para a atmosfera.

A perda total de N-NH<sub>3</sub> mais considerável ocorreu no tratamento em que foi aplicado o fertilizante ureia + sulfato de cálcio, em que 56 % (aproximadamente 111,95 kg ha<sup>-1</sup> de N) da dose de N aplicada foram perdidas por volatilização, evidenciando que o sulfato presente na matéria-prima utilizada para produzir os fertilizantes pastilhados com os micronutrientes B e Cu não se evidenciou efetivo em reduzir as perdas por volatilização da amônia. Da mesma maneira, a forma do fertilizante pastilhado - representado pelo tratamento ureia pastilhada - não produziu efeito positivo do tamanho da pastilha sobre a volatilização de N-NH<sub>3</sub>, uma vez que esse produto apresentou perda de 45,7 % do N aplicado, sendo semelhantes significativamente as perdas ocasionadas pela ureia granulada (46,6 %). As perdas de N-NH<sub>3</sub> foram em torno de 91,5 e 93,5 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para ureia pastilhada e ureia granulada (Figura 3).

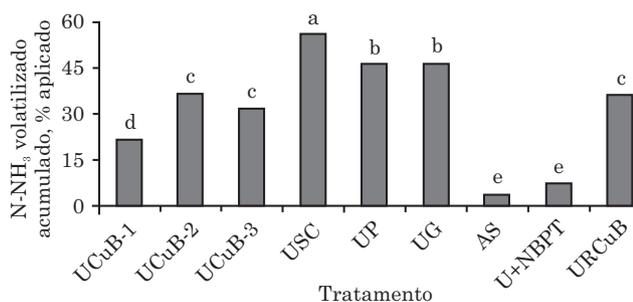
A adição dos micronutrientes Cu e B no processo de pastilhamento da ureia reduziu as perdas de amônia por volatilização, quando comparadas com a ureia granulada, uma vez que esses diferiram

significativamente entre si. Os tratamentos que receberam os fertilizantes pastilhados ureia<sub>Cu+B-2</sub> e ureia<sub>Cu+B-3</sub> apresentaram perdas de N-NH<sub>3</sub> semelhantes ao ocasionado pelo fertilizante comercial ureia revestida por Cu e B. Esse efeito, em média, ocasionou redução de 36,5 % para a ureia<sub>Cu+B-2</sub> e de 31,9 % para ureia<sub>Cu+B-3</sub> das perdas totais de N-NH<sub>3</sub>, ao final de 18 dias de avaliação em relação à dose de N utilizada (Figura 3).

Os produtos que resultaram nas menores perdas totais de N-NH<sub>3</sub> foram observados nos tratamentos que receberam os fertilizantes comerciais ureia contendo NBPT (N(n-butil) tiofosfórico amida) e o sulfato de amônio, que proporcionaram, respectivamente, em perdas totais de N-NH<sub>3</sub> em torno de 7,4 e 3,6 %, em relação à dose aplicada (Figura 3).



**Figura 2.** Temperatura e umidade relativa no interior da casa de vegetação referente ao período de avaliação das perdas por volatilização da amônia.



**Figura 3.** Perdas acumuladas por volatilização de N-NH<sub>3</sub> provenientes dos fertilizantes pastilhados de ureia com micronutrientes após 18 dias de avaliação, em que: UCuB-1 (ureia pastilhada com Cu e B, 38,8 % N; 0,5 % Cu; e 2,0 % B), UCuB-2 (ureia pastilhada com Cu e B, 40,08 % N; 2,0 % Cu; e 0,5 % B), UCuB-3 (ureia pastilhada com Cu e B, 42,78 % N; 0,5 % Cu; e 0,5 % B), USC (ureia pastilhada com sulfato de cálcio, 38,76 % N), UP (ureia pastilhada, 45,0 % N), UG (ureia granulada, 45,0 % N), U+NBPT (ureia contendo inibidor da urease NBPT, 45,0 % N), URCuB (ureia revestida com Cu e B, 44,08 % N; 0,06 % Cu e 0,3 % B) e AS (sulfato de amônio, 21,0 % N). Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Scott-Knot a 5 %.

A dinâmica de perdas do sulfato de amônio e da ureia contendo NBPT já foi estudada quanto à quantificação das perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização em diversas condições edafoclimáticas e os resultados observados foram semelhantes aos encontrados neste estudo (Pereira et al., 2009, Scivittaro et al., 2010).

Dentre os pastilhados de ureia contendo Cu e B, o que apresentou o melhor resultado referente à redução das perdas de N-NH<sub>3</sub> foi a ureia<sub>Cu+B-1</sub>, sendo significativamente diferente dos demais fertilizantes pastilhados e principalmente da ureia granulada comercial (Figura 3). As menores perdas de N-NH<sub>3</sub> encontradas nesse tratamento, pode ser em razão desse pastilhado ureia<sub>Cu+B-1</sub> possuir em sua composição maior concentração de B (2,0 %), o que equivaliu a uma aplicação de 10,1 kg ha<sup>-1</sup> de B, ao passo que os demais fertilizantes pastilhados avaliados nesse experimento possuíam concentração de 0,5 % B (em média 2,5 kg ha<sup>-1</sup> de B).

Esses resultados podem ser explicados em razão de o ácido bórico apresentar, de acordo com Benini et al. (2004), estrutura semelhante à da ureia, fazendo com que o B iniba a enzima urease de forma competitiva; ou seja, o B compete com a urease pelo mesmo sítio ativo do substrato (ureia). A N-NH<sub>3</sub> volatilizada acumulada ocasionada pelo fertilizante pastilhado ureia<sub>Cu+B-1</sub> foi de 21,8 % em relação à dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicada, ou seja, 43,69 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub> foi perdida por volatilização. Quando comparado com a perda de N-NH<sub>3</sub> proporcionada pela ureia granulada comercial (93,5 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>), o pastilhado ureia<sub>Cu+B-1</sub> resultou em redução de aproximadamente 54 % do N total perdido pela ureia granulada. Os pastilhados ureia<sub>Cu+B-2</sub> e ureia<sub>Cu+B-3</sub> apresentaram, respectivamente, perdas totais de 73,12 e 63,89 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>, totalizando perdas em torno de 36,5 e 31,9 % da dose aplicada, respectivamente. Esses fertilizantes pastilhados conseguiram reduzir em torno 21,7 e 31,8 %, respectivamente, para ureia<sub>Cu+B-2</sub> e ureia<sub>Cu+B-3</sub> as perdas de amônia por volatilização, quando comparadas com as perdas provocadas pelo uso da ureia granulada.

Uma vez que este estudo foi conduzido em ambiente controlado, principalmente no que se refere às variáveis ambientais temperatura e umidade, é importante frisar que o efeito positivo da ureia pastilhada com Cu e B em minorar as perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização não deve ser extrapolado para condições de campo, pois nesse lugar muitas vezes não ocorre a combinação de fatores favoráveis (umidade, temperatura e vento) para o processo de volatilização. Contudo, tais produtos evidenciaram-se promissores em atenuar as perdas de N por volatilização de amônia, demonstrando ser alternativa viável para aumentar a eficiência do N-ureia.

As taxas de perdas de N-NH<sub>3</sub> por volatilização se deram preferencialmente nas primeiras 72 h após a aplicação dos fertilizantes, principalmente para a ureia granulada comercial, ureia + sulfato de cálcio e ureia

pura pastilhada; o pico de perda observado ocorreu 48 h após a aplicação dos fertilizantes (Figura 4). Foram apresentadas as perdas referentes aos 10 primeiros dias, uma vez que após esse período os fertilizantes avaliados praticamente não apresentaram grandes variações na dinâmica de perdas de  $N-NH_3$ .

Os dois produtos comerciais estudados, a ureia contendo inibidor de urease (NBPT) e o sulfato de amônio, apresentaram dinâmica semelhante aos encontrados na literatura (Cantarella et al., 2007; Pereira et al., 2009; Scivittaro et al., 2010), no que se refere às perdas de N por volatilização. Esse fato comprova a eficiência do produto NBPT sobre a atividade da enzima urease e da reação química desfavorável à volatilização do  $N-NH_3$  do sulfato de amônio. Os fertilizantes pastilhados contendo os micronutrientes Cu e B comportaram-se de forma distinta, influenciados provavelmente pelas diferentes concentrações de B e Cu em sua composição. Os pastilhados apresentaram picos de perdas de  $N-NH_3$  por volatilização entre o 3º e o 5º dia, após a aplicação dos fertilizantes (Figura 4).

Como a ureia aplicada ao solo normalmente é hidrolisada em dois ou três dias e as perdas de  $N-NH_3$  mais significativas ocorrem nesse período (Barbieri & Echeverría, 2003; Ros et al., 2005), observou-se que os efeitos da adição de micronutrientes, principalmente no tratamento que recebeu o pastilhado ureia<sub>Cu+B-1</sub>, ocorreram nos momento de maior potencial de perdas por volatilização, confirmando assim a capacidade de esses elementos, especialmente o B, em reduzir as perdas por volatilização da amônia. Observou-se também que a ureia pastilhada com diferentes concentrações de Cu e B apresentaram picos de perdas

no 3º e no 5º dia após adubação, provavelmente em virtude da ação inibitória tanto do Cu quanto do B sobre a atividade da urease no solo, fazendo com que o N permanecesse no solo por maior tempo possível, em comparação com a ureia comercial. Após o 8º dia da aplicação dos fertilizantes, notou-se que praticamente não houve diferença acentuada entre os diversos tratamentos quanto às perdas diárias de  $N-NH_3$  por volatilização.

As significativas reduções nas perdas de N por volatilização podem ser explicadas pela ação inibitória tanto do Cu quanto do B sobre a atividade da urease. Pesquisas realizadas por Lijun et al. (2009), avaliando o efeito de diferentes concentrações de Cu sobre parâmetros cinéticos da urease, evidenciaram que o Cu poderia afetar levemente a afinidade entre a urease do solo e o substrato (ureia); ou seja, o Cu não exerce nenhuma influência sobre a configuração da urease no solo. Assim, a diminuição da atividade da urease no solo pode ser efetuada pela inibição por dissociação dos compostos ureia-urease (Aliyev et al., 1984; Dalal, 1985), revelando que o mecanismo de reação entre o Cu e a urease do solo caracteriza-se por ser uma inibição competitiva não reversível. Segundo Moraes et al. (2010), a inibição ocasionada pelo Cu parece ser também da competição desse com o níquel (componente que ativa a enzima urease).

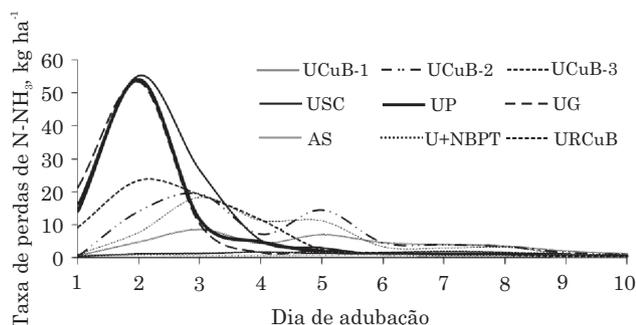
De acordo com Benini et al. (2004), o ácido bórico atua como inibidor competitivo com a urease em relação ao substrato (ureia), uma vez que a molécula de ácido bórico apresenta conformação semelhante à da ureia, competindo assim pelos mesmos sítios enzimáticos com a enzima urease, o que confere a esse elemento maior potencial em inibir a atividade da urease. Com isso, o B pode fazer com que a ureia permaneça no solo por tempo maior sem se dissociar, aumentando assim a eficiência do fertilizante nitrogenado.

## CONCLUSÕES

1. As perdas por volatilização de  $N-NH_3$  entre os fertilizantes avaliados, em ordem crescente, foram: sulfato de amônio = ureia+NBPT < ureia<sub>Cu+B-1</sub> < ureia<sub>Cu+B-3</sub> = ureia<sub>Cu+B-2</sub> = ureia<sub>CuB</sub> < ureia pastilhada = ureia granulada < ureia+sulfato de cálcio, neste trabalho, que foi conduzido em condições controladas.

2. A incorporação de Cu e B na ureia pastilhada demonstrou ser eficiente contra as perdas de  $N-NH_3$  por volatilização, reduzindo em até 54% a volatilização, quando comparada com ureia granulada comercial.

3. A ureia pastilhada com Cu e B evidenciou-se efetiva em reduzir as perdas de N por volatilização de amônia, quando comparada com outras fontes de nitrogênio, embora os resultados sejam provenientes de ambiente controlado.



**Figura 4.** Taxa de perdas de  $N-NH_3$  dos diferentes fertilizantes nitrogenados ao longo do tempo, em que: UCuB-1 (ureia pastilhada com Cu e B, 38,8 % N; 0,5 % Cu; e 2,0 % B), UCuB-2 (ureia pastilhada com Cu e B, 40,08 % N; 2,0 % Cu; e 0,5 % B), UCuB-3 (ureia pastilhada com Cu e B, 42,78 % N; 0,5 % Cu; e 0,5 % B), USC (ureia pastilhada com sulfato de cálcio, 38,76 % N), UP (ureia pastilhada, 45,0 % N), UG (ureia granulada, 45,0 % N), U+NBPT (ureia contendo inibidor da urease NBPT, 45,0 % N), URCuB (ureia revestida com Cu e B, 44,08 % N; 0,06 % Cu; e 0,3 % B) e AS (sulfato de amônio, 21,0 % N).

## AGRADECIMENTOS

À Petrobrás, pelo financiamento do projeto de pesquisa; à Capes, pela concessão da bolsa de estudo; e ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

## LITERATURA CITADA

- ALCARDE, J.C.; GUIDOLIN, J.A. & LOPES, A.S. Os adubos e a eficiência das adubações. 3.ed. São Paulo, Associação Nacional para Difusão de Adubos - ANDA, 1998. 35p. (Boletim Técnico)
- ALIYEV S.A.; GADJIYEV D.A. & MIKAILOV F.D. Kinetic and thermodynamic characteristics of enzyme-invertase and urease in Azerbaijan soils. *JIOYBOB*, 11:55-66, 1984.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA. Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2009-2010. São Paulo, 2010.
- ANTIL, R.S., GUPTA, A.P. & NARWAL, R.P. Effect of substrate concentration, soils tures and organic amendments on urease activity of soil containing variable amnoicuknetls. *Arid Soil Res. Rehab.*, 7:381-387, 1993.
- ARAÚJO, E.S.; MARSOLA, T.; MIYAZAWA, M.; SOARES, L.H.B.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. & ALVES, B.J.R. Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 44:769-776, 2009.
- BARBIERI, P.A. & ECHEVERRÍA, H.E. Evolucion de las perdas de amoníaco desde urea aplicada en otoño y primavera a una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*). *RIA*, 32:17-29, 2003.
- BENINI, S.; RYPNIEWSKI, W.R.; WILSON, K.S.; MANGANI, S. & CIURLI, S. Molecular details of urease inhibition by boric acid: Insights into the catalytic mechanism. *J. Am. Chem. Soc.*, 126:3714-3715, 2004.
- BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T. & TRIVELIN, P.C.O. Efficient use of N in conventional fertilizers. In: *NITROGEN CONFERENCE*, 4., Costa do Sauípe, 2007. Abstracts... Costa do Sauípe, 2007. p.33.
- CANTARELLA, H. Efficient use of N in new fertilizer products. In: *NITROGEN CONFERENCE*, 4., Costa do Sauípe, 2004. Anais... Costa do Sauípe, 2007a. p.44.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007b. p.375-470.
- DALAL R.C. Distribution, salinity, kinetic and thermodynamic characteristics of urease activity in a Vertisol profile. *Aust. J. Soil Res.*, 23:49-60, 1985.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- GABROVSKA, K. & GODJEVARGOVA, T. Optimum immobilization of urease modified acrylonitrile copolymer membranes: Inactivation by heavy metals ions. *J. Molec. Catalysis*, 60:69-75, 2009.
- GONG, P.; LI, P.J. & SUN, T.H. Ecotoxicological effects of Cd, Zn, phenan threne and MET combined pollution on soil microbe. *China Environ. Sci.*, 17:58-62, 1997.
- KIEHL, J.C. Distribuição e retenção da amônia no solo após a aplicação de ureia. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:75-80, 1989.
- LAI, C.M. & TABATABAI, M.A. Kinetic parameters of immobilized urease. *Soil Biol. Biochem.*, 24:225-228, 1992.
- LIJUN, F.; YANG, W. & YANGYE, W. Effects of copper pollution on the activity of soil invertase and urease in loquat orchards. *Chinese J. Geochem.*, 28:76-80, 2009.
- LOPES, A.S. & BASTOS, A.R.S. Fertilizantes nitrogenados no Brasil: Um problema de escassez. *Inf. Agron.*, 120:4-5, 2007.
- MORAES, M.F.; ABREU JUNIOR, C.H. & LAVRES JUNIOR, J. Micronutrientes. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V. & STIPP, S.R., eds. *Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes*. Piracicaba, IPNI, 2010. 2v. p.207-278.
- PEREIRA, H.S.; LEO, A.F.; VERGINASSI, A. & CARNEIRO, M.A.C. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1685-1694, 2009.
- REYNOLDS, C.M. & WOLF, D.C. Effects of soil moisture and air relative humidity on ammonia volatilization from surfaces-applied urea. *Soil Sci.*, 143:144-152, 1987.
- ROS, C.O.; AITA, C. & GIACOMINI, S.J. Volatilização de amônia com aplicação de ureia na superfície do solo, no sistema plantio direto. *Ci. Rural*, 35:799-805, 2005.
- SCIVITTARO, W.B.; GONÇALVES, D.R.N.; VALE, M.L.C. & RICORDI, V.G. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado a aplicação de ureia tratada com o inibidor NBPT. *Ci. Rural*, 40:1283-1289, 2010.
- SHEN, G.; LU, Y. & HONG, J. Combined effect of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons on urease activity in soil. *Ecotoxicol. Environ. Safety*, 63:474-480, 2006.
- STAFANATO, J.B. Aplicação de misturas granuladas NK e NS em cultivar de arroz (*Oryza sativa*). Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009. 67p. (Dissertação de Mestrado)
- VITTI, G.C.; TAVARES Jr, J.R.; LUZ, P.H.C.; FAVARIN, J.L. & COSTA, C.G. Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:663-671, 2002.
- WYSZKOWSKA, J.; KUCHARSKI, J. & LAJSZNER, W. Enzymatic activities in different soils contaminated with copper. *Polish J. Environ. Studies*, 14:659-664, 2005.
- ZHIXIN, Y. & SHUQING, L. Effect of compound pollution of heavy metals on soil enzyme activities. *Acta Sci. Ciscumst.*, 21:60-63, 2001.