

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

**Perdas de Nitrogênio por Volatilização e Lixiviação
Provenientes de Fertilizantes Granulados NK e NS**

Patrick Gesualdi Haim

2009



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**PERDAS DE NITROGÊNIO POR VOLATILIZAÇÃO E LIXIVIAÇÃO
PROVENIENTES DE FERTILIZANTES GRANULADOS NK E NS**

PATRICK GESUALDI HAIM

Sob a Orientação do Professor
Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho

e Co-orientação do Professor
Everaldo Zonta

Dissertação submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Mestre em**
Ciências, no Curso de Pós-Graduação em
Agronomia, Área de Concentração em
Ciência do Solo

Seropédica, RJ

Fevereiro de 2009

631.84 Haim, Patrick Gesualdi, 1979-
H151p Perdas de Nitrogênio por volatilização e
lixiviação provenientes de fertilizantes
T granulados NK e NS / Patrick Gesualdi Haim
- 2009.
75 f. : il.

Orientador: Nelson Moura Brasil do
Amaral Sobrinho.
Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de
Pós-Graduação em Agronomia.
Bibliografia: f. 67-75

1. Fertilizantes nitrogenados - Teses.
2. Solos - Lixiviação - Teses. 3.
Nitrogênio - Fixação - Teses. 4. Nitrogênio
na agricultura - Teses. I. Amaral Sobrinho,
Nelson Moura Brasil do, 1956-. II.
Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Curso de Pós-Graduação em
Agronomia. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

PATRICK GESUALDI HAIM

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/02/2009.

Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho. Dr. UFRRJ
(Orientador)

José Carlos Polidoro. Dr. Embrapa Solos

Alberto Carlos de Campos Bernardi. Dr. Embrapa Pecuária Sudeste

Aos meus pais, pela oportunidade da vida, pelo simples motivo de existirem.
Aos meus irmãos, sobrinho, por serem tão especiais.
Aos meus amigos pelo apoio em todos os momentos.
A Luna (in memorium).

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus Orientadores Dr. Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho e Dr. Everaldo Zonta, pela confiança, ensinamentos sem limites, amizade, incentivo, paciência, dedicação e exemplos de caráter e ética profissional;

Aos professores e pesquisadores Dr. Nelson Mazur e Dr. José Carlos Polidoro pelas críticas e sugestões;

Ao Ms. Carlos Guarino Werneck, pela amizade, convívio, troca de experiências e sugestões;

Aos amigos, Juliano, Fabrício, Hugo, Natalia, Marcio, Vinicius, Fabio, Rodolfo, Andréia, Valdemir, Diego, Alexandre, Anita, Beth, Morais e Samuel pela amizade e convívio;

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela oportunidade de realizar o curso de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo;

A Fundação de Apoio a Pesquisa da Universidade Rural, pelo auxílio a pesquisa;

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida;

A Petrobras por acreditar em nosso grupo de pesquisa;

As laboratoristas Renato, Bruno e Jair pelo apoio nas atividades;

Aos amigos-estagiários Edson, Leilane, Michel e Vitor pela contribuição na realização dos trabalhos, mesmo nas horas de descanso como final de semana e feriados onde mais trabalhávamos;

A Luciene, Marcos e Roberto por todo apoio.

MUITO OBRIGADO.

BIOGRAFIA

Patrick Gesualdi Haim, nasceu na cidade do Rio de Janeiro, RJ, em 25 de outubro de 1979. Ingressou na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 2000, diplomando-se em Agronomia em 2006. Durante a graduação foi bolsista durante quatro anos da Embrapa Solos. Ingressou no Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo - CPGA-CS em 2007 e concluiu sua dissertação de mestrado em fevereiro de 2009. Em março de 2009 ingressou no curso de Doutorado do CPGA-CS.

RESUMO

HAIM, Patrick Gesualdi. **Perdas de nitrogênio por volatilização e lixiviação provenientes de fertilizantes granulados NK e NS.** 2009. 59f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamentos de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ, 2009.

Com o objetivo de avaliar a volatilização de $N-NH_3$ e a lixiviação de N proveniente de misturas granuladas NK (uréia e cloreto de potássio) e NS (uréia e sulfato de amônio), em dois solos, realizou-se dois experimentos em casa de vegetação. A instalação do experimento seguiu o delineamento completamente casualizado, em esquema fatorial $12 \times 2 \times 2$ + tratamento controle (sem N), com 3 repetições. Os fatores avaliados foram: (a) fertilizante nitrogenado - uréia comercial (UR), sulfato de amônio (SA), uréia+KCl (NK) em seis proporções, uréia+SA (NS) em quatro proporções; (b) forma de incorporação - ausência e incorporado a 5cm; e (c) pH do solo, nos níveis pH natural e pH 6,5, resultando em 49 tratamentos, com 3 repetições, totalizando 147 unidades experimentais. Foram utilizados dois solos (Planossolo Háplico e Argissolo Vermelho Amarelo), em épocas distintas, acondicionados em colunas de PVC de 100mm de diâmetro e altura de 0,6m. Os fertilizantes foram aplicados na quantidade equivalente a $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$. O $N-NH_3$ volatilizado foi capturado por um coletor de amônia semi-aberto livre estático (SALE), durante 21 dias através de 9 coletas. Ao final do período de captura da amônia volatilizada, as colunas tiveram suas umidades elevadas com água deionizada, para a saturação do solo, com o objetivo de forçar a lixiviação. Foi adicionada água deionizada, como chuva simulada de 200 mm dia^{-1} . Após essa chuva, foram simuladas mais 3 dias de chuvas, com precipitações equivalentes a 50 mm dia^{-1} . As coletas das soluções lixiviadas foram realizadas uma vez por dia, durante 4 dias. As amostras foram analisadas para amônio + nitrato + nitrito. Logo após a lixiviação, as amostras foram retiradas das colunas de solo, com auxílio de tubo de PVC de 9 mm, como uma sondagem, e separadas em três seções de 20 cm, do topo até a base das colunas. As amostras foram analisadas para determinação de amônio e nitrato + nitrito pela metodologia de Bremner, com MgO e liga de Devarda, respectivamente. Nas condições testadas, os fertilizantes granulados NK e NS, enriquecidos com KCl e $(NH_4)_2SO_4$, não foram eficientes nas reduções das perdas por volatilização de $N-NH_3$, nos dois tipos de solo. As maiores perdas por lixiviação foram apresentadas pelas testemunhas (SA e UR). Os fertilizantes granulados apresentaram teores de biureto acima do preconizado pela legislação. O biureto causou inibição na nitrificação do $N-NH_4^+$, apresentando menores perdas e maiores proporções de $N-NH_4^+$ em relação ao $N-NO_3^-$, nas duas classes de solo. Isto ocorreu devido a redução na oxidação do $N-NH_4^+$, principalmente no solo argiloso, onde essa inibição foi mais intensa. Os fertilizantes de maior eficiência (N-capturado/N-aplicado) no solo mais arenoso (Planossolo) foram: NS-1; NK-3 (pH 5,5); NK-1 e NK-3 (pH 6,5). Para o solo mais argiloso (Argissolo), todos os fertilizantes granulados NK e NS apresentaram eficiência superior a 94%.

Palavras-chave: Fertilizantes nitrogenados. Uréia. Sulfato de amônio. Eficiência.

ABSTRACT

HAIM, Patrick Gesualdi. **Nitrogen losses by volatilization and leaching from a granulated fertilizer NK and NS.** 2009. 59p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2009.

In order to evaluate the volatilization of N-NH₃ and leaching of N from granulated mixtures NK (urea and potassium chloride) and NS (urea and ammonium sulfate) in two soils, two experiments were conducted in a greenhouse with controlled temperature and humidity. The experiment followed a completely randomized design, in factorial 12 x 2 x 2 + control treatment (without N), with 3 repetitions. The factors evaluated were: (a) nitrogen fertilizer - commercial urea (UR), ammonium sulfate (SA), urea + KCl (NK) in six different proportions, urea + SA (NS) in four different proportions; (b) forms of incorporation - absence and incorporated at 5cm; and (c) soil pH at natural pH levels and at pH 6.5, which resulted in 49 treatments with 3 repetitions, totaling 147 experimental units. Two soils (Fragiudult and Udult), packed into PVC columns, were used in different seasons. The fertilizers were applied at the amount equivalent to 120 kg N ha⁻¹. The volatilized N-NH₃ was trapped by an ammonia free semi-open static collector (SALE) for 21 days in 9 collections. At the end of the trapping of volatilized ammonia, the columns had their moisture increased with de-ionized water for soil saturation, aiming to force solution leaching. De-ionized water was added to simulate a rainfall of 200 mm per day⁻¹. After this rain, three additional rainy days were simulated with a rainfall equivalent to 50 mm day⁻¹. The collection of the leached solutions was done once a day for 4 days. The samples were analyzed for their content of ammonium + nitrate + nitrite. Immediately after leaching, the samples were removed from the soil columns with the help of a 9 mm PVC tube, used as a probe, and separated into three 20 cm sections, going from the top to the base of the columns. The samples were analyzed to determinate ammonium and nitrate + nitrite using the Bremner methodology, with MgO and Devard formula, respectively. In the test conditions, granulated NK and NS fertilizers enriched with KCl and (NH₄)₂ SO₄ were not efficient in reducing the N-NH₃ losses by leaching, in the two soil classes. The greatest losses from leaching were showed by the reference treatments (SA and UR). The granulated fertilizers presented levels of biuret above permitted by legislation. Biuret inhibited the nitrification of N-NO₄⁺, with smaller losses and larger proportions of N-NH₄⁺ in relation to N-NO₃⁻ in the two soil classes. This occurred because the reduction in the N-NH₄⁺ oxidation, principally in the clayey soil, where this inhibition was more intense. The most efficient fertilizers (captured N/applied N) in the sandy soil (Fragiudult) were: NS-1; NK-3 (pH 5.5); NK-1 e NK-3 (pH 6.5). For the clayey soil (Udult) all NK and NS granulated fertilizers presented efficiency above 94%.

Key words: Nitrogen Fertilizer. Urea. Ammonium sulfate. Efficiency.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise química dos solos utilizados.	12
Tabela 2. Análises granulométricas dos solos estudados.....	12
Tabela 3. Resultados analíticos das misturas granuladas NK e NS e das matérias primas*.....	15
Tabela 4. Quantidades de K, S e Biureto adicionados nos fertilizantes granulados em função da dose de 120 kg N ha ⁻¹	20
Tabela 5. Teores de pseudo-totais de metais pesados encontrados nas misturas granuladas e na matéria prima.....	24
Tabela 6. Perdas percentuais de N-NH ₃ volatilizado do total aplicado, provenientes dos fertilizantes nitrogenados aplicados em colunas de solo sob diferente formas de aplicação e pH.....	27
Tabela 7. Perdas percentuais de N-NH ₃ volatilizado do total aplicado, provenientes dos fertilizantes nitrogenados aplicados em colunas de solo sob diferente formas de aplicação e pH.....	34
Tabela 8. Nitrogênio mineral lixiviado do total aplicado (% N coluna ⁻¹), dos fertilizantes NK e NS aplicados sob diferentes formas de aplicação e valores de pH no solo de textura arenosa.....	39
Tabela 9. Médias do N-mineral lixiviado do total aplicado (mg coluna ⁻¹), dos produtos NK e NS aplicados sobre solo arenoso com diferentes formas de aplicação, independente do pH do solo.	41
Tabela 10. Teores residual de N-NH ₄ ⁺ e N-NO ₃ ⁻ + N-NO ₂ ⁻ (mg coluna ⁻¹), dos produtos NK e NS aplicados sobre solo arenoso, com diferentes formas de aplicação e pH.....	42
Tabela 11. Nitrogênio mineral lixiviado do total aplicado (% N coluna ⁻¹), dos fertilizantes NK e NS aplicados sob diferentes formas de aplicação e valores de pH no solo de textura argilosa.....	44
Tabela 12. Média do N-mineral lixiviado do total aplicado (mg coluna ⁻¹), dos produtos NK e NS aplicados sobre solo textura argilosa com diferentes formas de aplicação, independente do pH do solo.	44
Tabela 13. Teores residual de N-NH ₄ ⁺ e N-NO ₃ ⁻ + N-NO ₂ ⁻ do total aplicado (mg coluna ⁻¹), dos produtos NK e NS aplicados sobre solo argiloso, com diferentes formas de aplicação e pH.....	46
Tabela 14. Balanço indireto das perdas de N por volatilização e lixiviação, em colunas de solo arenoso, resultante da aplicação dos fertilizantes nitrogenados, em relação ao total aplicado.	48
Tabela 15. Balanço indireto das perdas de N por volatilização e lixiviação, em colunas de solo argiloso, resultante da aplicação dos fertilizantes nitrogenados, em relação ao total aplicado.	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Casa de vegetação climatizada.....	11
Figura 2. Local de coleta dos solos Planossolo (esquerda) Argissolo (direita), na UFRRJ.....	11
Figura 3. Tempo de estabilização do pH em função das doses de calcário adicionado ao solo de textura Arenosa.....	13
Figura 4. Tempo de estabilização do pH em função das doses de calcário adicionado ao solo de textura Argilosa.	13
Figura 5. Curva de neutralização em função da doses de calcário e do pH do solo de textura arenosa.	14
Figura 6. Curva de neutralização em função da doses de calcário e do pH do solo de textura argilosa.	14
Figura 7. Colunas de solos dispostas na mesa e a descontaminação da brita n°1 em solução HCL 5%.	17
Figura 8. Mesa como suporte para as colunas e as câmaras.....	17
Figura 9. Câmaras de captura de amônia (SALE).	18
Figura 10. Experimento de volatilização N-NH ₃	19
Figura 11. Experimento de lixiviação nas colunas de solo.	21
Figura 12. Simulação da precipitação, com uso de H ₂ O destilada.....	21
Figura 13. Temperatura máxima e mínima e umidade média no interior da casa de vegetação durante o período experimental, em solo arenoso.....	23
Figura 14. Temperatura máxima e mínima e umidade média no interior da casa de vegetação durante o período experimental, em solo argiloso.	23
Figura 15. Eficiência da câmara coletora de amônia (SALE) na recuperação do N-NH ₃ (%), proveniente do sulfato de amônio, aplicado em areia lavada com nebulização de NaOH 0,5N, nas condições estudadas, em tubos de PVC. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste tukey ao nível de 5%.	25
Figura 16. Perdas percentuais acumuladas de N-NH ₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura arenosa, em pH 5,5 sem incorporação.....	28
Figura 17. Perdas percentuais acumuladas de N-NH ₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura arenosa, em pH 5,5 com incorporação.....	29
Figura 18. Perdas percentuais acumuladas de N-NH ₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura arenosa, em pH 6,5 sem incorporação.	30
Figura 19. Perdas percentuais acumuladas de N-NH ₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura arenosa, em pH 6,5 com incorporação.....	31
Figura 20. Perdas diárias de amônia (N-NH ₃) por volatilização, proveniente da aplicação dos produtos NK (120 kg/ha ⁻¹), em colunas de solo (Planossolo Háplico, 0-20cm), sob 2 valores de pH e duas formas de incorporação.....	32
Figura 21. Perdas diárias de amônia (N-NH ₃) por volatilização, proveniente da aplicação dos produtos NS, UR e SA (120 kg/ha ⁻¹), em colunas de solo (Planossolo Háplico, 0-20cm), sob 2 valores de pH e duas formas de incorporação.	33

- Figura 22.** Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura argilosa, em pH 5,5 sem incorporação..... 36
- Figura 23.** Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura argilosa, em pH 5,5 com incorporação. 36
- Figura 24.** Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura argilosa, em pH 6,5 sem incorporação..... 37
- Figura 25.** Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura argilosa, em pH 6,5 com incorporação. 37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	Nitrogênio e Fertilizantes Nitrogenados Inorgânicos na Agricultura Brasileira.....	3
2.2	Formas de Nitrogênio no Solo	4
2.3	Lixiviação de Nitrogênio.....	5
2.4	Volatilização de N-NH ₃	6
2.5	Biureto no Solo.....	8
2.6	Métodos de Quantificação do N-NH ₃ Volatilizado do Solo	9
3	MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1	Caracterização da Área Experimental.....	11
3.2	Características e Incubação do Solo	11
3.3	Fertilizantes Granulados NK e NS.....	14
3.4	Ensaio de Ajuste para a Recuperação do N Volatilizado.....	15
3.5	Preparo das Colunas de Solo	16
3.6	Câmara Coletora de N-NH ₃	18
3.7	Delineamento Experimental.....	18
3.8	Instalação do Experimento	19
3.8.1	Condução do experimento de volatilização.....	19
3.8.2	Condução do experimento de lixiviação	20
3.9	Análises Estatísticas	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1	Temperatura e Umidade em Casa de Vegetação.....	22
4.2	Características Químicas dos Fertilizantes Granulados	24
4.3	Eficiência da Câmara de Volatilização na Metodologia Utilizada	24
4.4	Volatilização de N-NH ₃ Proveniente dos Fertilizantes Granulados	26
4.4.1	Solo de textura arenosa.....	26
4.4.2	Solo de textura argilosa	34
4.5	Lixiviação de N Proveniente dos Fertilizantes Granulados	38
4.5.1	Solo de textura arenosa.....	38
4.5.2	Teores de N mineral no solo (N-NO ₃ ⁻ + N-NO ₂ ⁻ e N-NH ₄ ⁺).....	41
4.6	Lixiviação de N Proveniente dos Fertilizantes Granulados	43
4.6.1	Solo de textura argilosa	43
4.6.2	Teores de N mineral no solo (N-NO ₃ ⁻ + N-NO ₂ e N-NH ₄ ⁺).....	45
4.7	Balanco Indireto das Perdas de N em Colunas de Solo	47
4.7.1	Solo de textura arenosa.....	47
4.7.2	Solo de textura argilosa	48
5	CONCLUSÕES	50
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

Na agricultura moderna grandes quantidades de substâncias inorgânicas são aplicadas sobre os solos através dos diversos insumos preconizados pelo desenvolvimento tecnológico ocorrido nas últimas décadas, caracterizando a agricultura como atividade potencialmente poluidora dos solos, ar e das águas subterrâneas, quando os insumos são utilizados de forma inadequada. Neste cenário, o uso de elevadas doses de fertilizantes em busca de altas produtividade, exercem significativa contribuição aos processos de poluição, destacando-se o uso do nitrogênio, principalmente a uréia.

Em razão do aumento crescente da população mundial e da demanda por alimentos, fibras e energia, o novo modelo de agricultura exigirá novos desafios em toda cadeia produtiva. As produtividades são potencialmente elevadas quando as perdas de nutrientes pelo sistemas agrícolas são reduzidas, o que é alcançado através do aumento da eficiência de uso de fertilizantes. A agricultura moderna foi responsável pela duplicação da produção de alimentos, nas últimas quatro décadas, sendo esta duplicação associada a um aumento na fertilização das lavouras com nitrogênio, evidenciando que a produção de alimentos e o uso de fertilizantes são fatores indissociáveis no mundo atual.

Atualmente, o Brasil importa 75% das necessidades de fertilizantes nitrogenados consumidos, e com o crescimento do consumo de pelo menos 3 a 4 % ao ano, o nível de dependência pelo produto importado se tornará cada vez mais crítico. Dessa forma, haverá significativo impacto negativo na balança comercial do país, além de tornar a disponibilidade deste suprimento mais vulnerável a fatores externos, razão pela qual é indispensável à realização de projetos de pesquisa voltados ao aumento da produção nacional e da eficiência dos fertilizantes nitrogenados. Estudos têm sido realizados no sentido de expandir a produção de amônia e uréia, mas a dificuldade quanto à disponibilidade de gás natural, aliadas à volatilidade dos seus preços, têm postergado a expansão dessa indústria.

O aumento na eficiência de uso de nutrientes pode ser obtido através do desenvolvimento tecnológico de fertilizantes de maior eficiência e também da adoção de melhores práticas de manejo de fertilizantes, as quais reúnem princípios básicos, como: adubações equilibradas; manejo específico de nutrientes; manejo integrado de nutrientes; fertilizações na época e na dose certa, e no local adequado. Para ser efetiva o manejo da adubação deve ser adaptado às condições específicas do clima local e da cultura, a fim de resultar no uso mais eficiente dos nutrientes pelos vegetais, sustentando a qualidade ambiental, a receita do agricultor e os objetivos sociais, necessário a atividade agrícola.

Como a uréia é a principal fonte de N-fertilizante, representando 50% do utilizado no Brasil e considerando a atual tendência de aumento, seria de fundamental importância uma maior divulgação das tecnologias de uso desses fertilizantes que minimizem as possíveis perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação e também um esforço das indústrias no desenvolvimento de processo de fabricação de novos produtos que possam diminuir essas possíveis perdas.

Entre tais perdas, destacam-se as perdas de N do solo por volatilização, sendo as mesmas influenciadas por diversos fatores. A aplicação de uréia, especialmente sobre solos com elevado pH, pode resultar em perdas por volatilização N-NH₃ de até 80% do N aplicado. Esse mecanismo de perda, exerce significativa influência sobre o baixo aproveitamento das plantas cultivadas sobre o N aplicado ao solo.

As perdas por volatilização de amônia, provenientes da aplicação de fertilizantes nitrogenados ao solo, podem ser minimizadas, através da adição de ácidos (H₃PO₄, H₂SO₄ e

HNO₃), sais (de Cálcio, Magnésio, Amônio e Potássio) e inibidores da urease. A mistura da uréia com outros produtos nitrogenados, como sulfato de amônio ou nitrato de amônio, também proporcionam reduções das perdas por volatilização de N-NH₃.

Pelo exposto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a dinâmica do nitrogênio proveniente dos fertilizantes granulados NK e NS, aplicados em colunas de PVC, preenchidas com solos de texturas contrastantes, e as eficiências alcançadas destes fertilizantes aplicados ao solo.

Será testada, portanto, a hipótese científica de que o uso de fertilizantes granulados (NK - granulação de uréia e cloreto de potássio, e, NS - granulação de uréia e sulfato de amônio) podem reduzir as perdas de nitrogênio, por volatilização de N-NH₃ e a lixiviação de N-mineral (N-NO₃⁻ + N-NO₂⁻ + N-NH₄⁺).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Nitrogênio e Fertilizantes Nitrogenados Inorgânicos na Agricultura Brasileira

O nitrogênio (N) é considerado o macronutriente mineral mais importante, seja no uso de fertilizante ou na constituição química das espécies vegetais (Raij, 1991). Dentre os compostos orgânicos indispensáveis na vida das plantas, o N é componente essencial de aminoácidos, proteínas, ácidos nucléicos, hormônios e clorofila. Dentre os elementos minerais necessários às plantas, o nitrogênio é o que mais limita o crescimento vegetal, sendo considerado um elemento de função estrutural nos vegetais, uma vez que faz parte da molécula de um ou mais compostos orgânicos (Malavolta, 2006). Além disso, o nitrogênio tem importante participação nos ciclos biogeoquímicos, sendo cerca de um quarto do gasto energético dos vegetais relacionado com as várias reações envolvidas na redução de nitrato à amônia e a subsequente incorporação às formas orgânicas nas plantas (Epstein e Bloom, 2005).

O nitrogênio (N) pode ingressar no sistema solo-planta por deposições atmosféricas, fixação biológica - simbióticas ou não e adubações químicas ou orgânicas. Por outro lado, pode sair do meio através da remoção pelas culturas e variados mecanismos de perdas, que incluem lixiviação, volatilização e desnitrificação. O ciclo do N é controlado por fatores físicos, químicos, e biológicos e afetado por condições climáticas de difícil previsão e controle.

Todos os fertilizantes nitrogenados derivam da amônia, matéria prima essencial para toda a linha de produção. Como exposto pelo Professor Mello Moraes, da ESALQ/USP, “a síntese de amônia – obtida por dois alemães Fritz Haber e Karl Bosch – foi uma das maiores invenções da humanidade, sem ela a produção de alimentos seria apenas suficiente para a metade dos 6 bilhões de pessoas hoje existentes no mundo”.

No Brasil, a Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados (Fafen), localizada em Laranjeiras (SE) e Camaçari (BA), e a Ultrafertil, em Cubatão (SP) e Araucária (PR), fabricam matérias-primas para adubos nitrogenados. O Brasil importou em 2007, 88,3 % da sua demanda de sulfato de amônio, 73,0 % de uréia (3º maior importador mundial de uréia), 76,9 % do nitrato de amônia. No Brasil, entre 1994 e 2007, o consumo de fertilizantes cresceu à taxa de 6,32% a.a. e atingiu o montante de 29,77 milhões de toneladas em 2007. Entre 1994 e 2007 o consumo de fertilizante quase triplicou em termos de volumes físicos (Anda, 2008).

As principais fontes nitrogenadas de fertilizantes inorgânicos consumidas no mundo são: uréia, sulfato de amônio, fosfato monoamônio (MAP), nitrocálcio, amônia anidra, aquamônia, uran, fosfato diamônio (DAP), nitrato de sódio, nitrato de cálcio e nitrosfosfatos.

O sulfato de amônio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, embora tenha baixa concentração de N (21%), possui 24% de enxofre (S), que o torna importante, em especial para aplicação em solos carentes desse elemento, características típicas de muitas regiões do Brasil. Seu uso excessivo tende a acidificar o solo, requerendo a correção do mesmo. Ele é um produto sólido, na forma de cristal ou granulado, produzido a partir da reação direta entre ácido sulfúrico e amônia. Entretanto, a maior parte de sua produção é originária do processo de produção de caprolactama, de metacrilato de metila ou mesmo de processos metalúrgicos ou outros de recuperação de gases sulfurosos (SO_x). Em 2006, a produção mundial foi de 18 milhões de toneladas, concentrando-se 37% desta na Europa Ocidental e nos Estados Unidos. Quanto a demanda, a Europa Ocidental (17%) e o Sudeste Asiático (16%) são as principais regiões consumidoras do produto. No Brasil, a participação do sulfato de amônio na matriz nitrogenada no mundo foi em torno de 16%, em 2006, sendo muito usado em muitas culturas,

como cana-de-açúcar e milho, devido à carência de S nos solos brasileiros. O consumo em 2006, no Brasil foi de 1.820.000 toneladas, sendo 87% oriundos do mercado externo. Atualmente, o Brasil é o maior importador de sulfato de amônio do mundo (Franco et al., 2007).

A uréia NH_2CONH_2 é um produto sólido, em formas de pérolas ou de grãos, que tem como principal característica o N na forma amídica (NH_2). A síntese para produção de uréia, a partir de amônia e gás carbônico, produzida numa mesma unidade, torna o produto menos oneroso, inclusive pelo fato da uréia possuir teor de N bem mais alto (46%), comparada com os demais produtos, o que proporciona um preço mais atrativo por tonelada de N. Como principais vantagens no uso da uréia citam-se sua maior concentração de N, entre todas as fontes nitrogenadas, e conseqüentemente os menores custos com transporte, armazenamento e aplicação, além da alta solubilidade, baixa corrosividade e facilidade de mistura com outras fontes (Melgar et al., 1999). Como desvantagens da uréia, destacam-se sua elevada higroscopicidade, possibilidade de apresentar biureto, devido ao processo de produção, a incompatibilidade com fosfatos e maior suscetibilidade à volatilização. No ano de 2007, a produção mundial alcançou 134,7 milhões de toneladas do produto, concentrando 49% dessa produção na China e na Índia. Por outro lado, estes mercados detem 54% do mercado (Franco et al., 2007).

A tendência do surgimento de novas plantas para produção de fertilizantes, devem se concentrar mais nos países em desenvolvimento e com maiores reservas de matérias-primas, em especial o gás natural.

2.2 Formas de Nitrogênio no Solo

O nitrogênio pode ocorrer nos solos na forma orgânica e inorgânica. Aproximadamente, 98% é encontrado na forma orgânica, que pode ser mineralizado durante o tempo, por meio da hidrólise enzimática, produzida pela atividade da microbiota do solo (Camargo et al. 1997; Tisdale et al. 1993). A mineralização dos constituintes nitrogenados libera para a solução do solo íons inorgânicos de N, principalmente amônio (N-NH_4^+) e nitrato (N-NO_3^-), os quais podem também se originar dos fertilizantes nitrogenados adicionados, que podem perfazer de 2 a 5% do N total do solo. Os íons disponibilizados na solução do solo podem ser adsorvidos ao solo, absorvidos pelas plantas, lixiviados das camadas superficiais do solo ou volatilizados para a atmosfera na forma de gases.

A adubação nitrogenada torna-se uma prática comum em solos tropicais, pobres no macronutriente de maior demanda metabólica pelas plantas. O N aplicado ao solo, depois de mineralizado, pode ser aproveitado pelas plantas na forma de N-NO_3^- ou N-NH_4^+ , ou ser perdido por lixiviação e/ou volatilização de N-NH_3 ou por outras formas gasosas (N_2 e N_2O). Também podem ficar imobilizados no solo pela ação de microrganismo e serem, gradualmente, transformados em formas estáveis que nele permanece (Urquiaga et al., 1993).

A desnitrificação é definida como um processo respiratório, que acontece na ausência de O_2 , no qual óxidos de N servem como receptores finais de elétrons. As perdas por desnitrificação podem ter grande peso nas perdas do nitrogênio do solo quando o solo se encontra saturado (Linn e Doran, 1984). De acordo com IPCC (1997), as perdas de N_2O devem ser bastante variáveis e difícil para estabelecer uma constante capaz de determinar as perdas globais.

O N-NH_4^+ é a fonte preferida de N pela planta, porque a energia gerada pela fotossíntese pode ser economizada pelos vegetais, quando essa forma é absorvida para a síntese de proteína. Esta forma de N-mineral é menos sujeita ao processo de perda de N através da lixiviação e da desnitrificação. Entretanto, o N-NO_3^- precisa ser reduzido antes de ser incorporado à proteína. O limite de tolerância de N-NH_4^+ é estreito, sendo que o excesso gera reações tóxicas. Níveis altos de N-NH_4^+ podem retardar o crescimento e absorção de

potássio pela planta, causando deficiência de potássio. Em contraste, as plantas toleram excesso de N-NO_3^- e acumulam altos níveis em seus tecidos (Tisdale et al., 1993).

2.3 Lixiviação de Nitrogênio

A perda de um nutriente em profundidade no solo por lixiviação ocorre quando um elemento ou molécula é arrastado ao longo do perfil, na solução do solo, para fora do ambiente de exploração do sistema radicular de uma planta, o que poderá causar várias conseqüências, desde a redução na eficiência da adubação, queda na fertilidade do solo até a contaminação do lençol freático (Bologna et. al., 2006). A lixiviação de N-NO_3^- é favorecida, principalmente, quando a precipitação for superior a evapotranspiração e o solo já estiver na capacidade de campo (Magdoff, 1991).

O N-NO_3^- é a forma mineral de nitrogênio predominante nos solos agrícolas sem restrição de oxigênio. Devido ao predomínio de cargas negativas na camada arável, a sua adsorção eletrostática é insignificante, e apresenta alta solubilidade em água. Desta forma, o nitrato permanece na solução do solo, o que favorece sua lixiviação no perfil para profundidades inexploradas pelas raízes (Ceretta e Fries, 1997). Em solos tropicais, no horizonte subsuperficial, com predomínio de cargas positivas, pode retardar consideravelmente a lixiviação do N-NO_3^- . No entanto, algumas vezes os íons NH_4^+ e NO_2^- também não são fortemente retidos pelos colóides do solo, permanecendo livre na solução do solo e sujeitos ao arraste pela água para fora do alcance das raízes (Libardi, 1984).

As quantidades perdidas de N-NO_3^- no perfil, susceptível à perda, são muito variáveis, dependendo da quantidade de nitrogênio adicionado, do tipo de solo, da taxa de mineralização do nitrogênio nativo, da remoção pelas colheitas, do tipo de cultura e do volume de água drenada, fatores esses afetados significativamente pelas propriedades do solo (capacidade de troca iônica, pH, textura, estrutura, matéria orgânica, relação C/N, etc.) e pelo clima (Reichardt; Timm, 2004).

O tipo de solo pode ter grande influência na magnitude do processo de lixiviação. Solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de nitrogênio, principalmente na forma de N-NH_4^+ , do que solos arenosos. A maior capacidade de armazenamento de água dos solos argilosos reduz a percolação da água pelo perfil e, conseqüentemente, o arraste de N-NO_3^- para camadas inferiores do solo (Bortolini, 2000; Camargo, 1989). O conteúdo de matéria orgânica também pode interferir na lixiviação de nitrato, em função da maior disponibilidade de nitrogênio decorrente da decomposição da matéria orgânica, principalmente, quando a área está sendo cultivada.

Outro fator que pode influenciar as perdas de N por lixiviação é a forma de aplicação do adubo nitrogenado. Perdas de N-NH_3 por volatilização são potencialmente maiores quando os fertilizantes são aplicados em superfície e em solos secos (Bouweester et al., 1985). Além disso, a volatilização pode ser intensificada quando os resíduos culturais ficam sobre a superfície do solo. Entretanto, a lixiviação de N pode ser maior quando se incorpora o adubo nitrogenado, devido à redução na possibilidade de perdas de N por volatilização, resultando em maiores concentrações deste nutriente na solução do solo (Sangoi et al., 1997). A cobertura vegetal sobre a superfície do solo também pode favorecer o movimento descendente de NO_3^- via macroporos, devido a menor evaporação da água (Muzilli, 1983).

A uréia e o N-NH_4^+ podem mover-se no solo por difusão ou fluxo de massa. Portanto, a umidade inicial e a direção para qual a água se move no solo afetam a taxa e a quantidade de NH_3 volatilizada (Reynolds e Wolf, 1987; Kiehl, 1989; Rodrigues e Kiehl, 1992).

Caso as condições climáticas não sejam favoráveis à evaporação, a umidade do solo pode permitir a difusão da uréia da superfície para o interior do solo, reduzindo a volatilização de N-NH_3 . No entanto, a movimentação da uréia por difusão não é grande. Sadeghi et al. (1989), estudando o coeficiente de difusão de uréia em sete solos, observaram que a

profundidade máxima de movimentação, em 48 horas variou, de 2,6 a 3,5 cm em solos com teores de umidade em torno de 20%. Nesse experimento, a urease foi destruída antes da aplicação do fertilizante, e os solos foram incubados em ambiente fechado. Kiehl (1989), usando amostras de solo umedecidas à 50% da capacidade de campo e nas quais a atividade enzimática foi mantida, observou, 15 dias após a aplicação superficial de uréia, a presença de amônio a 7-8 cm de profundidade em Areia Quartzosa e a 3-4 cm em uma Terra Roxa estruturada. Em condições de campo, o efeito da urease e da evaporação pode reduzir a profundidade até o ponto em que a uréia se move por difusão, porém não deve ser descartada a possibilidade de que parte da uréia aplicada na superfície seja incorporada, por difusão, a solos com altos teores de umidade, com a conseqüente redução das perdas de N-NH₃.

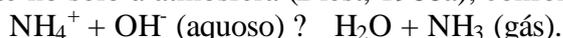
A determinação da quantidade de N perdido por lixiviação pode ser realizada pelos métodos da extração da solução do solo por cápsulas porosas (Camargo, 1989), coleta da solução percolada em colunas de solo (Wang; Alva, 1996), coleta de solução percolada em lisímetros (Deville, 1984), uso da técnica TDR (Time Domain Reflectometry) (Reichardt, Libardi; Urquiaga, 1982) e modelos matemáticos de previsão de lixiviação (Thorburn; Meier; Probert, 2005).

Fenilli (2006) trabalhando com o balanço de ¹⁵N na cultura do café observou perda de 6,5 kg ha⁻¹ a um metro de profundidade, representando 2,3% de recuperação do fertilizante, quando da aplicação de 280 kg N ha⁻¹ na forma de sulfato de amônio. As causas apresentadas pela baixa ocorrência de lixiviação foram os parcelamentos na aplicação do fertilizante e a característica do solo argiloso em apresentar maior capacidade de retenção de água e menor condutividade hidráulica.

De acordo com a revisão feita por Urquiaga et al. (1993) a perda por lixiviação de N, determinada com o uso de ¹⁵N, em trabalhos conduzidos no Brasil, em diferentes solos e culturas, na maioria dos casos (75%), as perdas do N-fertilizantes não superaram os 2 kg N ha⁻¹ (com abubações, em média de 88 kg N ha⁻¹). Deve-se destacar que somente em duas situações (Araujo Silva, 1982; Camargo et al., 1989) as perdas foram altas (11 e 34%), respectivamente, isto é, em sítios com intensas e frequentes chuvas que caíram logo após a adubação.

2.4 Volatilização de N-NH₃

O processo de perda por volatilização de N-NH₃ consiste na passagem da N-NH₃ presente no solo à atmosfera (Diest, 1988a), conforme a seguinte reação:



O N-NH₃ perdido por volatilização será proveniente da mineralização da matéria orgânica ou do fertilizante aplicado, sendo esse o fenômeno mais intenso mediante aumento no pH do solo (Melo, 1978). A uréia aplicada é rapidamente hidrolisada em dois ou três dias (Byrnes, 2000). A volatilização de N-NH₃ é um processo rápido que ocorre na semana após aplicação de N (Diest, 1988b). Assim, quando a uréia é aplicada ao solo, o processo de perda N-NH₃ por volatilização envolve, inicialmente, a hidrólise catalizada pela urease, que é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo ou, ainda, originada de restos vegetais. Como resultado da hidrólise, tem-se a formação de carbonato de amônio que não é estável e que se desdobra em NH₃, CO₂ e água (Volk, 1959). Parte do N-NH₃ formado reage com íons H⁺ da solução do solo e com íons H⁺ dissociáveis do complexo coloidal, resultando no cátion N-NH₄⁺.

Segundo (Volk, 1959), a hidrólise da uréia ocorre em solos com vários teores de umidade, porém quanto mais rápida a hidrólise, maior o potencial de perda de N-NH₃. A adição de água tem influência direta na hidrólise, promovendo aumento na difusão da uréia e conseqüentemente, maior contato com a urease no solo (Savant et al, 1987). Todos os fatores que influenciam o pH do solo do sistema solo-água irão influenciar a taxa de perdas. Desse

modo, valores elevados de pH conduzem a altas perdas de N-NH₃ (Freney et al, 1985; Hargrove, 1988; Byrnes, 2000), a qual pode representar entre 50 a 80% do total de N aplicado (Volk, 1959), dependendo das condições climáticas e das características do solo.

Outros fatores que afetam a volatilização da amônia são: a temperatura; a umidade; as trocas gasosas; a taxa de evaporação de água; o conteúdo de água no solo; o pH; o poder tampão do solo; a capacidade de troca catiônica; a classe textural e a atividade da urease (Freney et al, 1985; Hargrove, 1988; Byrnes, 2000). Outros autores, ainda consideram também: a concentração de N-NH₄⁺ na água de alagamento; o pH da água; a velocidade do vento; a quantidade de N aplicado; o momento vegetativo da planta no momento da aplicação e o método de aplicação de N (Mikkelsen et al., 1978; Vlek e Stumpe, 1978; Vlek e Craswell, 1981; Mikkelsen, 1987 e Jayaweera e Mikkelsen, 1991).

Em função das características da urease, fatores que influenciam a atividade dos microorganismos também influenciam a hidrólise da uréia, promovendo grande variação na taxa de hidrólise para diferentes solos (Reynolds et al., 1987). A diminuição deste potencial de perda ocorre quando esse gás passa para o íon amônio (NH₄), que depende do pH em torno do grânulo da uréia e da umidade do solo (Clóvis et al., 2005). Esta passagem é intensificada pela difusão da amônia no solo e depende de textura, porosidade, umidade e da capacidade em reter amônio (Lara Cabezas et al., 1997).

Rodrigues e Kiehl (1986), observaram que a aplicação de uréia em cobertura resultou na perda de quase todo nitrogênio, ao passo que, quando incorporada a 5 cm de profundidade permitiu melhor controle da volatilização. Os autores observaram também que a aplicação em profundidade mostrou-se mais efetiva em reduzir a volatilização de amônia quando a menor dose de uréia foi utilizada. No entanto, o sistema de plantio direto, não tem favorecido esta incorporação, devido à presença de espessas camadas de palhada sobre a superfície do solo, sendo a uréia aplicada a lanço e ainda sobre os restos culturais, onde a atividade da urease tende a ser mais elevada, aumentando a volatilização de amônia (Moal et al., 1995). Por outro lado, a presença de restos culturais eleva a CTC do solo (Souza e Alves, 1995), podendo reduzir a volatilização de amônia. A quantidade de N perdido por volatilização, após a aplicação de uréia sobre a superfície do solo, em sistema de plantio direto, atingiu 78% do N aplicado em cultura de milho, ao passo que as perdas em sistema convencional, também com a cultura do milho, foram de 30%. (Lara Cabezas et al., 1997).

A volatilização da amônia pode ser a principal forma de perda de N de solos agrícolas (Bouwmeester et al., 1985). A desnitrificação é outro processo que pode ter um grande peso nas perdas de N do solo, porém espera-se que ocorra em condições de alta saturação dos poros do solo com água. Neste processo, N₂ e N₂O são as formas gasosas de N que volatilizam do solo, mas espera-se que a primeira ocorra de forma mais significativa quando o solo está praticamente saturado (Linn e Doran, 1984). Dessa forma, a quantificação da produção de N₂O pode ser um indicador eficiente da desnitrificação para solos drenados. De acordo com o IPCC (1997), as perdas de N através de N₂O devem ser bastante variáveis e a incerteza para estabelecer uma constante capaz de prever perdas globais é muito grande.

A redução das perdas de N por volatilização de NH₃ também tem sido testada com a adição de sais solúveis à uréia (Rappaport & Axley, 1984; Fenn et al., 1981). Rappaport & Axley (1984) relataram redução na volatilização de NH₃ de 42 para 5% com a mistura de KCl à uréia em solução. Posteriormente, Gameh et al. (1990) observaram redução de perdas de NH₃ de 28% com uréia para 14% com uréia recoberta com KCl e para 17% em solução de uréia com KCl, com misturas com relação de aproximadamente 1:1 de uréia e KCl. Os autores atribuíram a diminuição das perdas de NH₃ à acidificação do solo provocada pelo KCl (Gameh et al., 1990). Efeitos dessa magnitude não foram mais reproduzidos (Kiehl, 1989b). Pequenas reduções na taxa de hidrólise e nas perdas por volatilização de NH₃ são ocasionalmente relatadas (Kong et al., 1991), mas os efeitos são em geral, pouco

significativos. Por outro lado, Kong et al.(1991) observaram ligeiro aumento na volatilização de NH_3 em uma mistura de uréia com KCl utilizada à cana sem despalha a fogo na Austrália, dada a alcalinidade presente no lote de KCl utilizado (pH e 8,2 em solução).

Fenn et al. (1982) mostraram que o KCl reduziu as PVN quando aplicado em conjunto com a uréia, sendo o efeito atribuído ao deslocamento do Ca^{2+} para a solução do solo, decorrente da adsorção de K^+ pelo complexo sortivo do solo, e sua posterior precipitação com o CO_2 , proveniente da hidrólise da uréia, paralelamente a formação de NH_4Cl , o que, possivelmente, diminuiu o acúmulo de NH_4OH , dessa forma, contribuindo com a redução das perdas. Efeitos dessa magnitude não foram mais reproduzidos, principalmente em solos tropicais (Kiehl, 1989). Portanto, a adição de KCl à uréia não parece uma alternativa segura para o controle das perdas de NH_3 .

A mistura de uréia com outros fertilizantes nitrogenados permite reduzir as perdas de NH_3 por volatilização proporcionalmente à participação, na formulação, dos fertilizantes estáveis em condições de solo ácido. Esses são os casos de misturas de uréia com sulfato de amônio ou com nitrato de amônio (uran) (Lara Cabezas et al., 1992; Costa et al., 2003; Vitti et al., 2005). Alguns experimentos têm mostrado que a acidez do sulfato de amônio pode provocar redução nas perdas de NH_3 em proporção um pouco superior à sua contribuição com o N da mistura com uréia (Watson, 1988; Oeneme e Velthof, 1993). Entretanto, Villas Boas et al. (2005) concluíram que a mistura com sulfato de amônio não provocou aumento na recuperação do N da uréia por plantas de milho. As condições experimentais no estudo de Villas Boas et al. (2005) não foram favoráveis a perdas de NH_3 por volatilização.

O sulfato de amônio, fertilizante utilizado como fonte de nitrogênio e enxofre, não sofre volatilização de nitrogênio amoniacal quando o pH é inferior a 7, mesmo sendo aplicado sobre restos cultura (Wolk, 1959). Quando a uréia é aplicada misturada com sulfato de amônio, a recuperação de nitrogênio é mais eficiente do que quando a aplicação de uréia é realizada em mistura com sulfato de amônio no mesmo grânulo (Villas Boas, 1995).

2.5 Biureto no Solo

O biureto ($\text{C}_2\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_2$) é um produto da decomposição termal da uréia, é formado quando duas moléculas de uréia se combinam, liberando uma molécula de amônia (Kurze, 1956). Biureto puro contém 23,3% C, 40,8% N, 30,0% O, e 4,0 % H. A uréia fertilizante comercial normalmente contém quantidades pequenas e variáveis de biureto como uma impureza, que é formada durante a granulação da uréia cristalina quando aquecido perto do seu ponto de fundição, à 132 ° C (Mikkelsen, 1990).

Quando a uréia é aquecida perto ou acima do seu ponto de fundição, NH_3 é lentamente desenvolvida e várias substâncias diferentes, inclusive biureto, são formadas (Mikkelsen, 2007).

Muitos estudos foram feitos para determinar a máxima concentração de biureto tolerado pelas culturas. A sensibilidade da cultura depende de muitos fatores como a espécie, propriedades de solo, o método e regulação de tempo da aplicação do fertilizante, e tanto concentração como soma total de biureto aplicado. O Biureto não é conservado no solo e é facilmente lixiviado. Geralmente as plantas são menos sensíveis ao biureto quando ele é aplicado aos solos que contem apreciável quantidade de argila ou matéria orgânica ou baixo pH (Mikkelsen, 2007).

De uma maneira geral, para que se tenha segurança no uso da uréia, pesquisadores definiram um teor seguro de biureto quando a uréia for usada para aplicação foliar de até 0,25% e de 2,0% quando a uréia for aplicada diretamente no solo (Mithyantha et al., 1977). Já a legislação (MAPA. Instrução Normativa N^o 05) limita o teor de biureto na uréia em até 1,5% para recomendação de aplicação direta no solo e 0,3% para recomendação de aplicação

foliar. Os lotes de produto que eventualmente apresentarem teores superiores a estes não podem ser comercializados, uma vez que podem causar prejuízos à lavoura.

Xue et al. (2003) verificaram taxas de mineralização de biureto em solos de textura arenosa na ordem de 80% (ou seja, 80% do N aplicado no solo com biureto foi mineralizado durante as primeiras quatro semanas de experimento, numa dose de 1000 mg de biureto por kg de solo, o que equivale a uma quantidade de nitrogênio de 408 mg por kg de solo), enquanto que Sahrawat (1981) encontrou taxas de mineralização de biureto na ordem de 16-18% do nitrogênio aplicado como biureto em solos também de textura arenosa. Os autores conferem essas diferenças ao fato de que solos estudados possuíam diferentes teores de C org totais. Os solos estudados por Xue et al (2003) possuíam teor de c org de 7,0%, enquanto no solo usado por Sahrawat (1981) o teor foi de no máximo 0,6%. Desta forma, aumentaria o crescimento microbiano, a atividade biológica nesses solos, e por consequência a taxa de mineralização do N.

Xue et al. (2003) concluíram que o biureto tem um efeito de iniciador da mineralização de nitrogênio no solo, disponibilizando quantidades deste nutriente que pode estimular o crescimento inicial da biomassa microbiana do solo, quando aplicado em baixas concentrações. Em concentrações mais elevadas ele pode funcionar como um fertilizante nitrogenado de liberação lenta para espécies arbóreas, dependendo do tipo de solo. Solos com textura argilosa têm taxa de mineralização mais lenta do nitrogênio do biureto e apresentam, portanto, melhores resultados a longo prazo. O biureto, em concentrações muito elevadas pode causar efeitos negativos sobre a biomassa microbiana do solo, mas não foram verificados danos significativos à população de microrganismos ligados às transformações do nitrogênio no solo.

Estudos também comprovam influência do biureto na nitrificação do N do solo. Bhargava e Ghosh (1976) reportaram que o biureto retardou a nitrificação da uréia hidrolisada e que o grau de retardo estava diretamente relacionado à concentração de biureto na uréia. Sahrawat (1977) verificou que o biureto não afeta diretamente a hidrólise da uréia, mas sim inibe, temporariamente, a conversão de $N-NH_4^+$ para $N-NO_3^-$ e a subsequente oxidação de $N-NO_2^-$ para $N-NO_3^-$. Quando biureto é adicionado ao solo junto com a uréia, a concentração tanto de $N-NH_4^+$ quanto $N-NO_2^-$ são mais altas no solo que receberam somente uréia. Low e Piper (1970), entretanto, encontraram efeitos não detectáveis do biureto sobre a nitrificação de nitrogênio proveniente de uréia em três tipos de solos da Inglaterra.

2.6 Métodos de Quantificação do N-NH₃ Volatilizado do Solo

A quantificação do N volatilizado pode ser realizada por meios de métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos necessitam de aparelhos específicos, sofisticados e onerosos, como o micrometeorológico que integra o fluxo de entrada e saída de amônia em grande área. A vantagem desse método é que ele não altera as condições ambientais próximas à superfície do solo (Trevelin, 2001). Os métodos com câmaras são relativamente simples, práticos e com custos reduzidos e são classificados como fechado-estático (Volk, 1959, Sommer et al., 1991), fechado-dinâmico (Kissel et al., 1977) e semi-aberto estático (Nõnmik, 1973). Porém, apresentam a desvantagem de ter as condições climáticas alteradas em seu interior. Fatores como temperatura, umidade relativa, ventilação, comprimento e intensidade das ondas luminosas e formação de orvalho diferem entre o interior das câmaras e o que realmente ocorre no campo, influenciando o processo de volatilização (Lara Cabezas e Trivelin, 1990; Trivelin, 2001).

Os métodos indiretos podem ser realizados, utilizando fertilizante isotopicamente marcado (^{15}N), no qual as perdas de amônia são estimadas indiretamente pela diferença entre a massa de ^{15}N aplicada e a massa recuperada, após um determinado tempo de medida (Trevelin, 2001). Por esse método podem ser quantificadas as perdas por volatilização, desde

que as perdas por desnitrificação e lixiviação sejam evitadas ou quantificadas. Também é possível calibrar métodos diretos que utilizam câmaras coletoras.

Os métodos fechados ocasionam a formação de microclima e a modificação das condições ambientais no seu interior, como temperatura, ventilação, umidade relativa, intensidade e comprimento de onda e a formação de orvalho. Dessa forma, o sistema mais utilizado é o semi-aberto estático descrito por Nönmik (1973) e modificado por Lara e Trivelin (1990) e Lara et al. (1999). O sistema original, sem modificações, também ainda é utilizado (Cantarella et al. 2003, Port et al. 2003).

O método proposto por Marsola et al. (2000), consiste em um coletor tipo PET, com uma fita de papel filtro, embebida em solução absorvedora de NH_3 . Esse sistema em casa de vegetação e com baixas taxas de volatilização, apresentou alta eficiência na recuperação do N- NH_3 volatilizado do meio. Entretanto, apesar de utilizado em condições de campo (Guedes, 2002, Hungria et al. 2006), este sistema coletor ainda não foi calibrado para estas condições.

A câmara coletora (Marsola et al, 2000), modificada por Araújo et al, (2006) consiste em um coletor SALE (semi- aberto livre estático), que é de baixo custo e de fácil manuseio, que permitiu recuperar 50% e 70% do N- NH_3 volatilizado do solo em condições similares ao campo e em casa de vegetação com ventilação, respectivamente. A presença do sistema coletor reduz a evaporação de água do solo, a reciclagem da água evaporada praticamente não ocorre, havendo apenas uma redução da evaporação pela baixa circulação de ar. Ao contrário ocorre com o coletor fechado dinâmico, onde McGarity e Rajaratnam (1973), observaram reciclagem do N- NH_3 com a água condensada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área Experimental

Os experimentos foram realizados no Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, localizada em Seropédica, RJ. (22^o45' de latitude sul e 43^o41' de longitude oeste e altitude de 33 m), O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada (Figura 1).



Figura 1. Casa de vegetação climatizada.

3.2 Características e Incubação do Solo

Os solos selecionados utilizados nas colunas de PVC, foram provenientes de um horizonte A de um Planossolo Háptico (textura arenosa) e horizonte B de um Argissolo Vermelho Amarelo (textura argilosa), retirados na área da UFRRJ próximo a instalação da bovino de leite, ilustrado na Figura 2. Posteriormente, foram secos ao ar, peneirados em malha de 4 mm, e caracterizadas química e fisicamente. Para cada solo foi realizado um experimento, em épocas distintas.



Figura 2. Local de coleta dos solos Planossolo (esquerda) Argissolo (direita), na UFRRJ.

As análises químicas e físicas do solo foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Departamento de Solos/UFRRJ, segundo os procedimentos do Manual de Análises Químicas dos Solos, Plantas e Fertilizantes (Silva, 1999) e os procedimentos do Manual de Métodos de Análises de Solos (Embrapa/CNPS 1997) e os resultados estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Análise química dos solos utilizados.

Solo	Na	Ca	Mg	H + Al	Al	S	T	V	m*	n**	pH H ₂ O	Corg	P	K
	-----cmol/dm ⁵ -----					-----%-----			1:2,5	g/kg	--mg/L--			
Planossolo T. Arenosa	0,016	1,2	0,3	2,5	0,5	1,59	4,09	39	24	0	5,5	10,2	3	30
Argissolo T. Argilosa	0,010	1,8	1,0	2,0	0,35	2,47	4,77	52	4	0	5,4	5,4	8	18

***m-saturação por Al; **n-saturação por Na.**

Tabela 2. Análises granulométricas dos solos estudados.

Amostra	Argila Natural	Argila Total	Areia Total	Areia Fina	Silte
	-----g kg ⁻¹ -----				
Planossolo T. Arenosa	30	70	920	210	10
Argissolo T. Argilosa	40	490	350	60	160

Os ensaios conduzidos em casa de vegetação, para analisar as perdas por volatilização e lixiviação, foram realizados em colunas de solo com o pH original e a pH 6,5. A quantidade de CaCO₃ necessária para elevar o pH do solo a 6,5 foi definida a partir da construção de uma curva de neutralização (Figuras 5 e 6). Estes solos foram incubados com doses crescentes de calcário, variando de 0,05 a 12,8 Mg ha⁻¹. Os valores de pH em água foram medidos entre os tempos de 0 a 32 dias de incubação, com umidade equivalente a 70% da capacidade de campo.

Para as correções do pH dos solos de textura arenosa e argilosa, foi utilizado calcário agrícola dolomítico e, posteriormente, foi realizada a correção da recomendação de calcário em função do PRNT do calcário utilizado. Com o PRNT do calcário aplicado no experimento obteve-se a real recomendação de calcário para o solo de textura arenosa e argilosa, que foi de 1,88 e 2,10 Mg ha⁻¹ calcário dolomítico 75,1% PRNT 20cm⁻¹, respectivamente.

Na Figura 3 é ilustrado o efeito do CaCO₃ e o tempo de estabilização do pH em função das doses para o solo de textura arenosa. De forma análoga ao observado para esse solo, no de textura argilosa (Figura 4), o pH também se estabilizou após o período de 24 horas de incubação.

Esse comportamento semelhante quanto a estabilização do pH, nos dois solos, foi decorrente provavelmente, do teor de matéria orgânica mais elevado para o solo arenoso e a maior quantidade de argila no solo argiloso, conforme pode ser observado nas Tabela 1 e 2 e, que conferiu a estes dois solos capacidades de tamponamento do pH semelhantes.

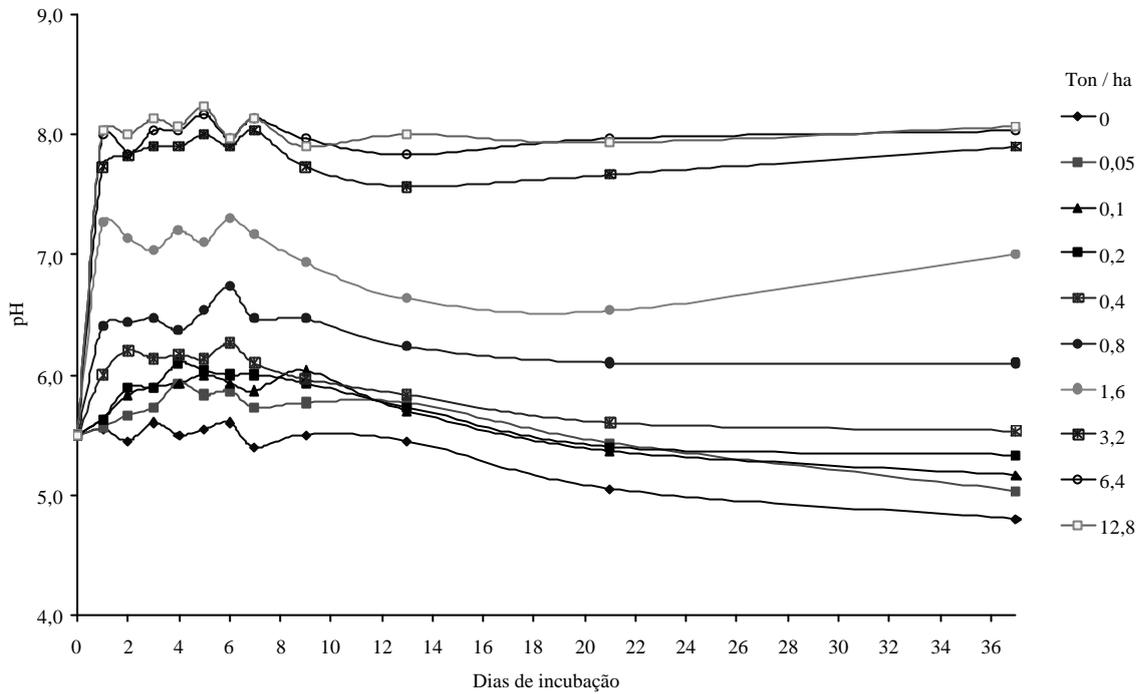


Figura 3. Tempo de estabilização do pH em função das doses de calcário adicionado ao solo de textura Arenosa.

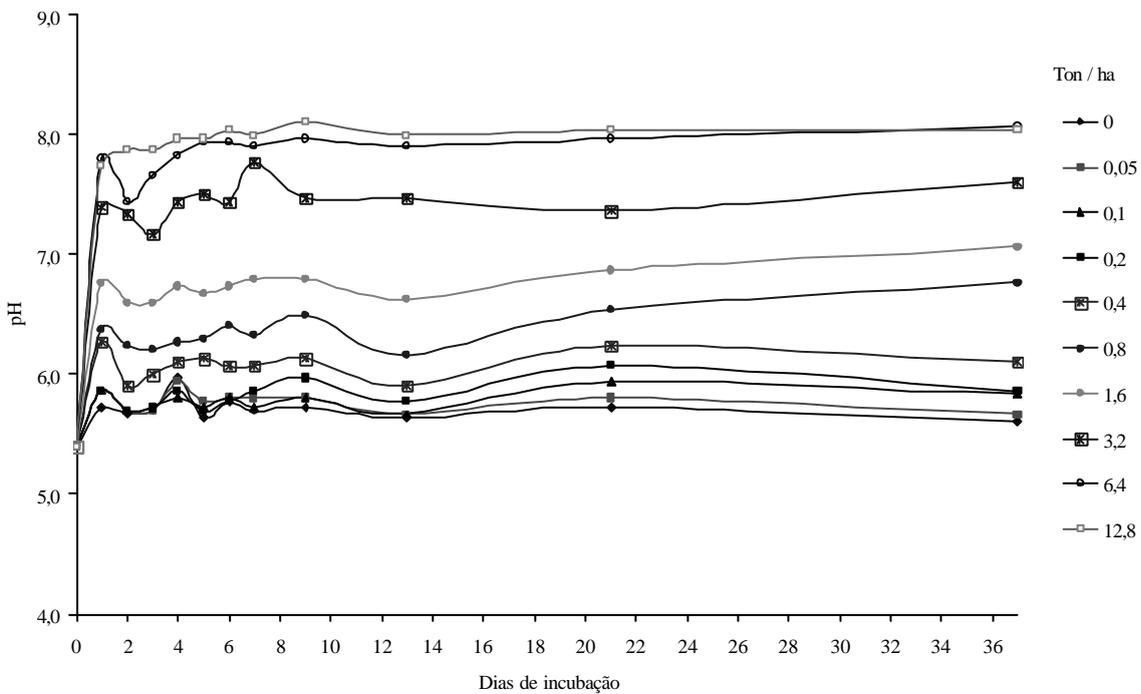


Figura 4. Tempo de estabilização do pH em função das doses de calcário adicionado ao solo de textura Argilosa.

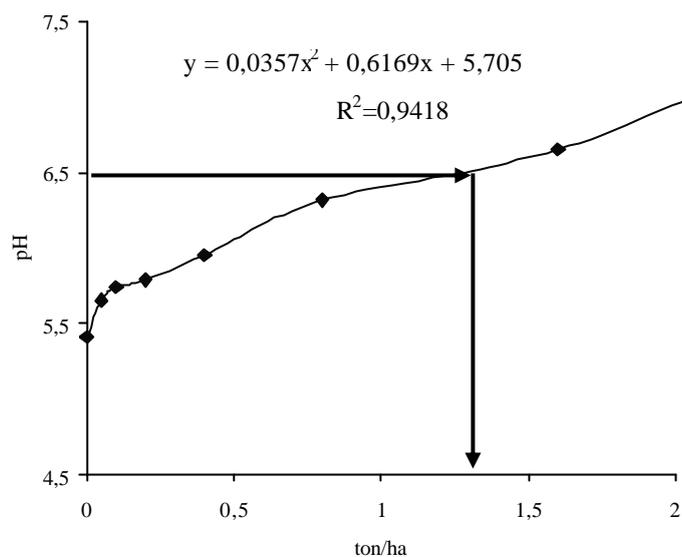


Figura 5. Curva de neutralização em função da doses de calcário e do pH do solo de textura arenosa.

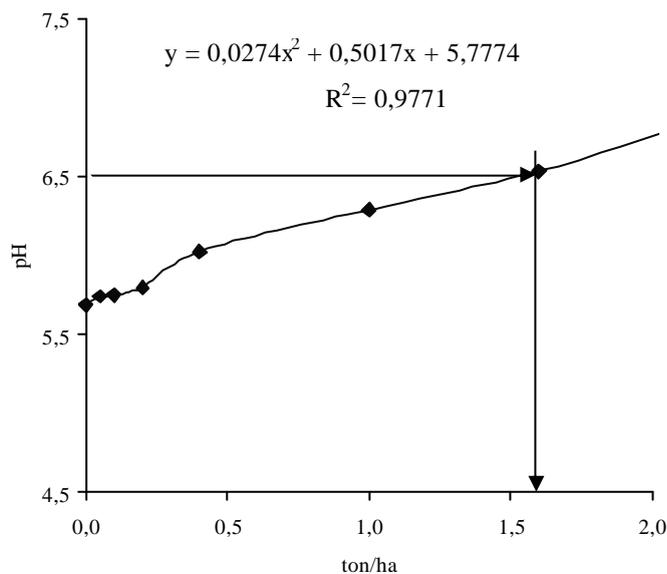


Figura 6. Curva de neutralização em função da doses de calcário e do pH do solo de textura argilosa.

3.3 Fertilizantes Granulados NK e NS

Os produtos foram desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), pelo processo de granulação no disco de pelotização, através de um contrato entre a CENPES-Petrobrás. São resultantes de duas linhas de pesquisa de produção de fertilizantes, empregando a técnica de pelotização: NK - granulação de uréia e cloreto de potássio e NS - granulação de uréia e sulfato de amônio. Foram utilizados 10 produtos, além do emprego da uréia comercial e do sulfato de amônio.

Foram também realizados testes visando avaliar as características físicas dos materiais granulados. A metodologia dos ensaios permitiu a obtenção de materiais granulados com

características físicas satisfatórias, segundo relatório técnico final N° 97064-205 realizado pelo IPT.

Por determinação da legislação há necessidade de caracterização dos fertilizantes, principalmente quanto aos teores dos nutrientes e a presença de elementos tóxicos e/ou passíveis de contaminação do meio ambiente (MAPA).

Os métodos utilizados, para a determinação dos teores de nutrientes, metais e biureto, foram os preconizados pelo MAPA (Brasil, 2007), de acordo com a Instrução Normativa N° 28, DE 27 DE JULHO DE 2007. As análises foram realizadas em triplicata pelo laboratório do MAPA (Ref. Laboratório Nacional de Referência Vegetal – LANARV - Goiânia – GO).

A caracterização dos produtos quanto aos teores de N (em suas diferentes formas), K₂O e S, encontram-se na Tabela 3. Os teores de metais pesados (Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cromo e Mercúrio), encontram-se na tabela 5.

Tabela 3. Resultados analíticos das misturas granuladas NK e NS e das matérias primas*.

Produto	Composição	Proporção Uréia/KCl	N total	N amídico	N amoniacoal	K ₂ O potássio	S enxofre
NK-1	Uréia pura	100/0	45,2	45,2	0,0	0,0	0,0
NK-3	Uréia/KCl	72,7/27,3	32,5	32,5	0,0	17,2	0,0
NK-5	Uréia/KCl	80,5/19,5	35,7	35,7	0,0	17,0	0,0
NK-7	Uréia/KCl/H ₂ O	80,0/14,0/6,0	36,5	36,5	0,0	9,1	0,0
NK-9	Uréia/KCl	57,2/42,8	26,0	26,0	0,0	26,0	0,0
NK-11	Uréia/KCl	47,1/52,9	21,0	21,0	0,0	32,0	0,0
NS-1	Uréia/(NH ₄) ₂ SO ₄	60/40	35,2	27,1	8,1	0,0	9,4
NS-3	Uréia/(NH ₄) ₂ SO ₄	80/20	40,2	36,2	4,0	0,0	4,7
NS-5	Uréia/(NH ₄) ₂ SO ₄ / H ₂ O	60/40/X	34,3	26,7	7,6	0,0	8,8
NS-7	Uréia/(NH ₄) ₂ SO ₄ / H ₂ O	80/20/X	38,6	35,0	3,6	0,0	4,2
SA	(NH ₄) ₂ SO ₄	0/100	21,0	0,0	21,0	0,0	23,5
UR	Uréia Comercial	100/0	44,5	44,5	0,0	0,0	0,0

*média de três repetições.

3.4 Ensaio de Ajuste para a Recuperação do N Volatilizado

Para a condução do experimento com os produtos foi necessário um ensaio prévio para ajuste metodológico. De acordo com os resultados apresentados por Araújo (2008), a curva de regressão do N-uréia aplicado e o N-uréia recuperado foi linear, indicando que a eficiência de recuperação do N-fertilizante não varia com a dose aplicada, portanto, para a calibração pode ser realizada dose única.

Com o objetivo de verificar a eficiência do método de volatilização da câmara coletora (Araújo et al., 2006), aplicado nas condições da metodologia estudada em colunas de PVC, foi conduzido experimento na casa de vegetação climatizada do Departamento de Solos da UFRRJ. Foram utilizadas colunas de PVC de 100 mm e altura de 0.2m.

Um primeiro ensaio foi conduzido nas colunas de PVC, preenchidas com substrato inerte, constituído de areia lavada, descontaminada e isento de N. O nitrogênio foi aplicado, homogeneamente, na superfície da coluna, na forma de Sulfato de Amônio (21% de N), devido ausência da enzima urease no substrato.

A quantidade aplicada foi equivalente a 120 kg N ha⁻¹, aplicados na forma de sulfato de amônio (96 mg de Sulfato de Amônio/coluna) e tratamento controle (sem N), com 12 repetições. Imediatamente, após a adição do fertilizante, instalou-se a câmara coletora de amônia. Para favorecer a completa volatilização do N, no primeiro dia foi nebulizado a

superfície da coluna 50 ml de NaOH 0,5 N, para elevação do pH, a valores superiores a 7,0. A coleta do volatilizado foi realizada após 48 horas da aplicação. Um segundo ensaio foi instalado em condições semelhantes, entretanto a coleta foi realizada após seis dias.

As análises do N-NH₃ volatilizado foi realizado no destilador de arraste a vapor e titulado com NaOH 0,25N, segundo metodologia descrita por Alves (1994). O cálculo da eficiência foi realizado pela fórmula:

$$\text{EFICIÊNCIA} = \frac{\text{N capturado}}{\text{N aplicado}} \times 100$$

3.5 Preparo das Colunas de Solo

As unidades experimentais foram construídas utilizando tubos de PVC de 100 mm de diâmetro e altura de 0.6 m, tendo na parte inferior duas reduções de 100 x 50 mm e 50 x 40 mm. A redução de 100 x 50 mm foi preenchida com brita N^o1, descontaminada. As extremidades inferiores e superiores foram revestidas com material filtrante, constituído por uma tela de nylon, para evitar perda de solo ou turvamento das amostras do material a ser coletado nos ensaios de lixiviação, em potes coletores. A base dos tubos foi aquecida e as reduções fixadas. Os tubos e as reduções foram vedados com uma borracha de silicone. Na parte superior de cada coluna foram deixados 5 cm sem solo para possibilitar a adição da solução de percolação, simulando precipitações.

A brita n^o1 foi descontaminada com água corrente e permaneceu em repouso por 24 h em uma solução de ácido clorídrico a 5% (Figura 7). Ao final dessa etapa, a brita foi enxaguada com água deionizada por 3 vezes e colocada para secar, antes de serem utilizadas nas colunas de solo.

O preenchimento das colunas, iniciado pela base, foi feito com terra fina seca ao ar (TFSA), devidamente homogeneizada, o qual foi submetido a uma leve compactação quilo a quilo, com um Becker, para evitar diferença na acomodação do substrato.

As confecções das mesas, utilizadas como suportes das colunas de solos, receberam ferro e madeira como matéria prima. Foram construídas 2 mesas com capacidade para 66 colunas. A parte inferior da mesa apresenta um compensado de madeira com 74 furos com encaixe perfeito no diâmetro da redução de 50 x 40. Na parte superior foi construída uma tela de vergalhões finos, com a finalidade de suporte para as câmaras de captura de N-NH₃, conforme demonstrado na Figura 8.



Figura 7. Colunas de solos dispostas na mesa e a descontaminação da brita n°1 em solução HCL 5%.



Figura 8. Mesa como suporte para as colunas e as câmaras.

3.6 Câmara Coletora de N-NH₃

O nitrogênio volatilizado foi capturado por uma câmara coletora (Marsola et al, 2000), modificada por Araújo et al, (2006). Um coletor de amônia semi-aberto livre estático (SALE) confeccionado a partir de frasco plástico transparente, tipo PET de 2 litros, sem a base, com diâmetro de 10 cm, abrangendo 0,008 m² de área. No interior do frasco PET suspendeu-se de forma vertical, com o auxílio de um fio rígido de 1,5 mm, uma lâmina de espuma de poliuretano com 3 mm de espessura, 2,5 cm de largura e 25 cm de comprimento. Antes da instalação, adicionaram-se 10 ml de solução de H₂SO₄ 1 M + glicerina (2% v/v) em frasco de 50 ml. Posteriormente, a lâmina de espuma foi acondicionada dentro do frasco e, a seguir, comprimida de forma a reter a maior parte da solução. A lâmina de espuma permaneceu no frasco fechado, até o momento da instalação no frasco PET.

No momento da instalação, o frasco de 50 ml foi preso em uma das extremidades do fio rígido, com auxílio de um elástico e a lâmina de espuma foi mantida com a extremidade inferior dentro do frasco de 50 ml, de forma a evitar respingos da solução captadora no substrato. A outra extremidade da espuma foi presa no fio rígido, mantendo-a na posição vertical. O fio rígido, com o frasco de 50 ml e a espuma, foi introduzido no frasco PET pela base e preso na borda superior, mantendo-se suspenso a aproximadamente 1,5 cm do substrato (Araújo et al, 2006). O sistema coletor, depois de instalado, recebeu leve pressão de forma a permitir contato parcial com as colunas de solo. A inserção nas colunas não foi total pela diferença no corte das garrafas na base, permitindo a circulação de ar (Figura 9). A amônia volatilizada foi captada na forma de (NH₄)₂SO₄ (Marsola et., 2000).



Figura 9. Câmaras de captura de amônia (SALE).

3.7 Delineamento Experimental

A instalação do experimento, com os solos de texturas arenosa e argilosa, foram realizados em épocas distintas, e seguiram o delineamento experimental completamente casualizado, em esquema fatorial 12 x 2 x 2 com 3 repetições, sendo os fatores: (a) fertilizante nitrogenado: uréia comercial (UR); sulfato de amônio (SA); uréia+KCl (NK) em seis

diferentes proporções, e uréia+SA (NS) em quatro diferentes proporções; (b) forma de incorporação: ausência e incorporado a 5cm; e (c) pH do solo: pH natural e pH 6,5, resultando em 49 tratamentos, com 3repetições, totalizando 147 unidades experimentais. Para fins de comparação foi introduzido um branco (sem aplicação de N).

3.8 Instalação do Experimento

Os experimentos foram instalados antes da aplicação dos fertilizantes. As colunas de solos foram arranjadas ao acaso nas mesas e submetidas por um período de 10 dias, com 70% da Capacidade de campo (CC), para aclimação da biota no solo e a produção da urease.

3.8.1 Condução do experimento de volatilização

Após o período de aclimação da biota no solo, os 12 fertilizantes foram aplicados nas colunas de solo, na quantidade equivalente a $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$. Imediatamente, após a adição do fertilizante, instalou-se a câmara coletora de amônia (Figura 10). Foram realizados os experimentos nos dois tipos de solo, entretanto, em épocas diferentes.



Figura 10. Experimento de volatilização N-NH_3 .

Na Tabela 4 são apresentadas as quantidades de potássio (K^+), enxofre (S) e de biureto, aplicadas juntamente com cada fertilizante granulado NK, em função da dose de $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$. Verifica-se que o fertilizante NK⁻¹ teve a maior quantidade de biureto aplicado e o fertilizante NK-5 foi o que apresentou a menor dose de biureto. Quanto a quantidade de K^+ aplicado o fertilizante NK-11 que possui em sua composição um maior teor de K_2O foi o que teve uma maior quantidade de K aplicado, o fertilizante NK-7 foi o que proporcionou uma menor quantidade de potássio aplicado, sendo o fertilizante com menor teor de K_2O .

Na Tabela 4 verifica-se que o fertilizante granulado NS-1 apresentou, em função da sua composição, maior quantidade de S aplicado no solo; já o fertilizante NS-7 apresentou a menor dose de S aplicado.

Tabela 4. Quantidades de K, S e Biureto adicionados nos fertilizantes granulados em função da dose de 120 kg N ha⁻¹.

Tratamento	N	K ₂ O	S	K	S	Biureto
NK-1	45,2	-	-	-	-	18,58
NK-3	32,5	17,2	-	63,51	-	12,18
NK-5	35,7	12,0	-	40,34	-	10,76
NK-7	36,5	9,1	-	29,92	-	11,84
NK-9	26,0	26,0	-	120,00	-	12,46
NK-11	21,0	32,0	-	182,86	-	13,14
NS-1	35,2	-	9,4	-	32,05	14,66
NS-3	40,2	-	4,7	-	14,03	14,92
NS-5	34,3	-	8,8	-	30,79	14,35
NS-7	38,6	-	4,2	-	13,06	9,95
Uréia	44,5	-	-	-	-	1,12

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%.

A umidade do substrato nas colunas foi mantida entre 50 a 70% da capacidade de retenção de água, com água deionizada nos primeiros 21 dias, através do método de pesagens diárias dos vasos, onde a diferença de peso era adicionada com água destilada por meio de proveta graduada, apenas para a captura da amônia volatilizada, durante as 9 coletas realizadas aos 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 17 e 21 dias, após a aplicação. Após cada coleta de N-NH₃ nos potes de 50 ml, a câmara era substituída, rapidamente.

Os potes com as amostras de N-NH₃ volatilizadas foram conservados em geladeira e, posteriormente, analisadas. No laboratório, a solução ácida e a espuma foram transferidas para um Erlenmeyer de 250 ml, onde foi adicionado 50 ml de água destilada e agitado a uma rotação de 220 RPM, por 15 minutos. Posteriormente, uma alíquota de 5 ml foi transferida para tubo de destilação, a qual foi destilada com solução diluída de NaOH, e titulada com solução de ácido sulfúrico, segundo metodologia descrita por Alves (1994).

3.8.2 Condução do experimento de lixiviação

O estudo foi conduzido, através de experimentos instalados em casa de vegetação climatizada. Para a determinação das perdas de N por lixiviação, pela aplicação de diferentes fertilizantes granulados, enriquecidos com KCl ou (NH₄)₂SO₄, em colunas de solo, sob diferentes formas de aplicação e pH.

Ao final do período de captura da N-NH₃ volatilizada, o teor de umidade nas colunas foi elevado com água deionizada até a saturação, para promover a lixiviação. Para tal, foi adicionada água deionizada, como chuva simulada de 200 mm dia⁻¹, equivalente a 1,6 litros. Após essa chuva, foram simuladas mais 3 dias de chuva, com precipitações equivalentes a 50 mm dia⁻¹ (Figuras 11 e 12).

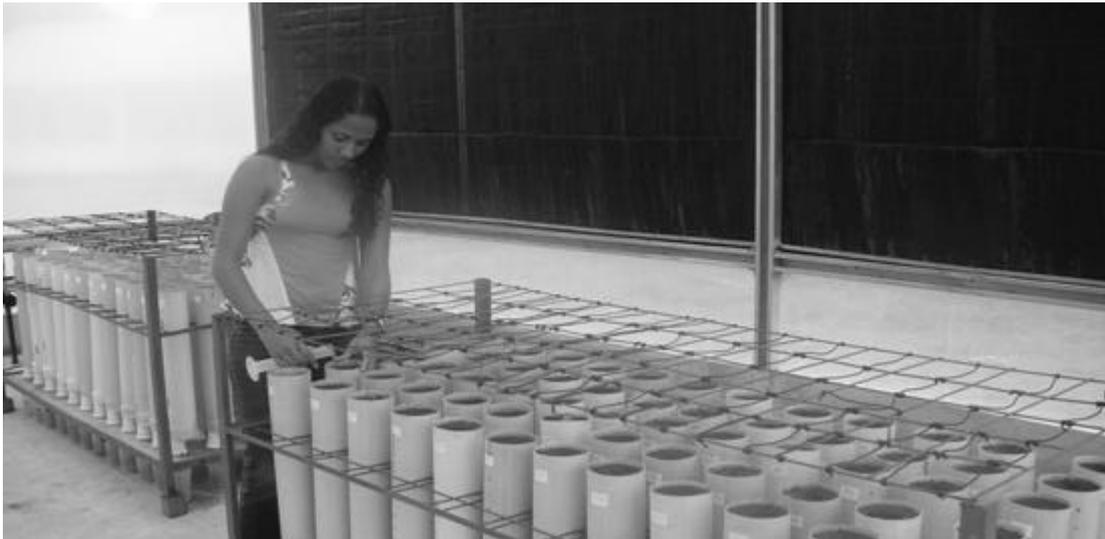


Figura 11. Experimento de lixiviação nas colunas de solo.



Figura 12. Simulação da precipitação, com uso de H₂O destilada.

As soluções lixiviadas foram coletadas uma vez por dia, por 4 dias. As amostras foram conservadas em freezer (-7°C), uma vez que as formas de N se modificam rapidamente em temperatura ambiente devido as reações microbianas. Posteriormente, foram analisadas para N-mineral (N-NH₄ + N-NO₃ + N-NO₂) pela destilação da amostra com MgO e liga de Devarda, em destilador de arraste de vapor, como descrito por Bremner, (1965) e modificada por Tedesco et al, (1995).

Logo após a lixiviação, as amostras foram retiradas das colunas de solo, com auxílio de tubo de PVC de 9 mm, usado como sonda, e separadas em 3 seções de 20 cm, do topo até a base das colunas. As amostras foram homogeneizadas e um volume de 10cm³ de solo úmido foi colocado em frascos erlenmeyer, de 250 ml, aos quais se adicionaram 50 ml de uma solução de KCl 2 mol L⁻¹, que foram agitados a 220 rpm, por 1 hora. O extrato foi filtrado e a solução do solo foi extraída. Esta solução foi armazenada no freezer (-7°C) e, posteriormente, analisada para determinação de amônio e nitrato + nitrito pela metodologia de Bremner, (1965) e modificada por Tedesco, (1995) com MgO e liga de Devarda, respectivamente.

3.9 Análises Estatísticas

Os dados foram analisados utilizando-se os recursos do sistema de análise estatística do SAEG. Os dados foram testados quanto à normalidade dos erros e homogeneidade de variância, utilizando-se Lilliefors e Cochran-Bartlett, respectivamente. Realizou-se a análise de variância, e, para as diferenças significativas, aplicou-se teste de Scott-Knott (1974).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Temperatura e Umidade em Casa de Vegetação

A temperatura e a umidade média na casa de vegetação (Figuras 13 e 14), onde se instalou o experimento, foi de 32°C e de 61% respectivamente, para solo de textura arenosa e 27°C e de 75% umidade para o experimento com o solo de textura argilosa. Esta condição foi favorável a hidrólise da uréia e das perdas por volatilização de N-NH₃. Além dessas condições, a corrente de ar gerada pelo sistema de climatização e as temperaturas também favoreceram a volatilização de N-NH₃. A hidrólise da uréia aumenta com a elevação da temperatura até 40°C (Bremner & Mulvaney, 1978), entretanto, decresce rapidamente, com o abaixamento da temperatura. Ernst & Massey (1960) observaram que entre 8 e 16°C as perdas de N-NH₃ foram reduzidas em 71 e 56%, respectivamente, em relação à observada a 32°C.

Para todos os tratamentos avaliados, durante o período de monitoramento da volatilização de N-NH₃, a umidade do solo variou entre 50 a 70% da CC. Portanto, as perdas por volatilização de N-NH₃ após aplicação dos fertilizantes granulados não foram alteradas pela umidade do solo. Em solo seco, a uréia pode permanecer estável, pela baixa atividade da urease (Volk, 1966), entretanto, a taxa de hidrólise aumenta conforme o teor de água do solo se eleva, até que este atinja 20%, a partir desse ponto, a taxa de hidrólise é pouco alterada pelo teor de água (Bremner & Mulvaney, 1978).

Reynolds & Wolf (1987), demonstraram que o ar desumidificado provoca rápido secamento do solo e reduz as perdas, mas, se o solo tiver um suprimento de água que mantenha a evaporação, a ventilação com ar de baixa umidade relativa não diminui a volatilização de N-NH₃. Por outro lado, ar com umidade relativa alta (>85%) resultou em perda substanciais de N-NH₃ em solo seco tratado com uréia, devido à natureza higroscópica do fertilizante.

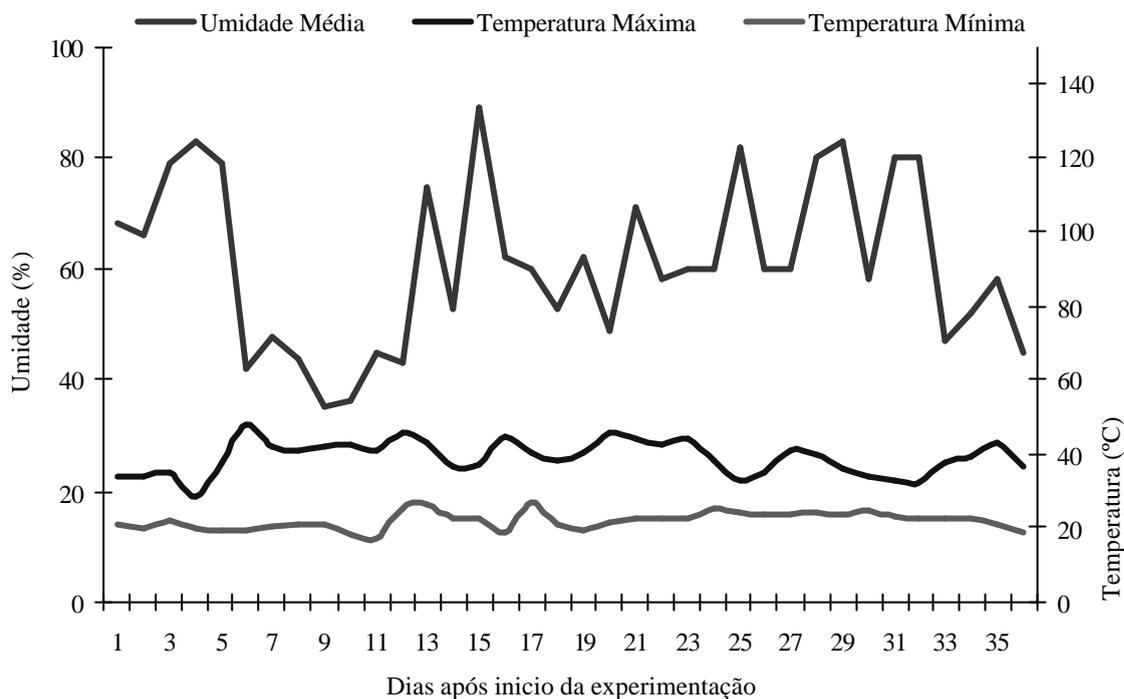


Figura 13. Temperatura máxima e mínima e umidade média no interior da casa de vegetação durante o período experimental, em solo arenoso.

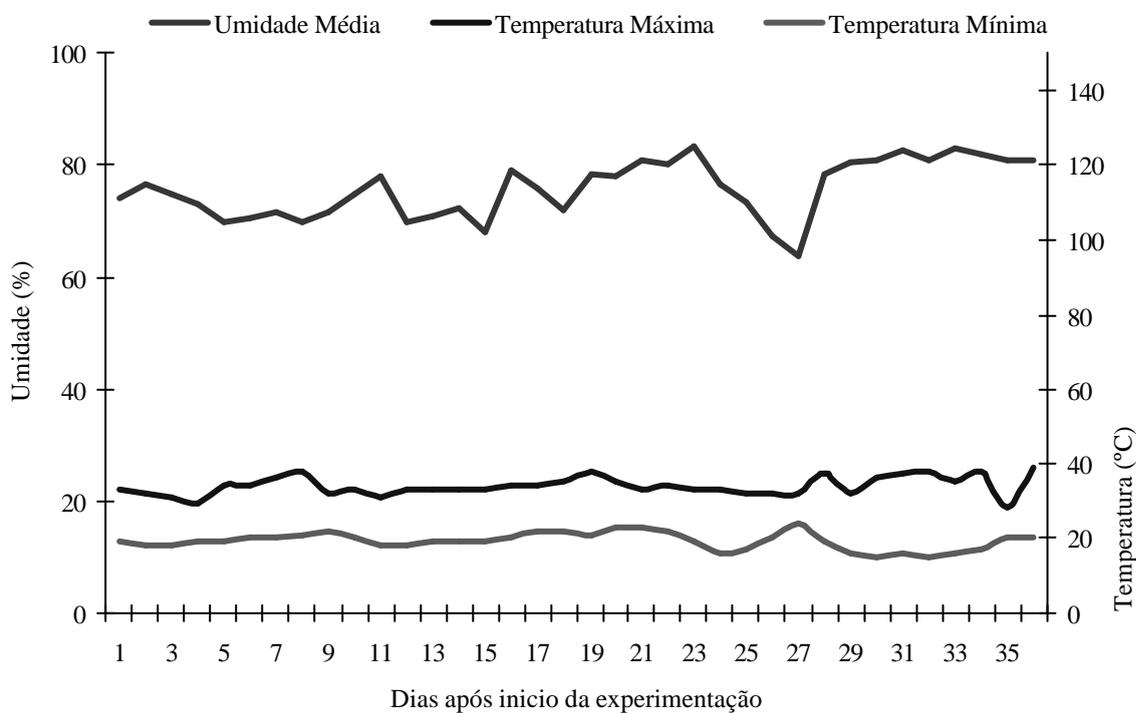


Figura 14. Temperatura máxima e mínima e umidade média no interior da casa de vegetação durante o período experimental, em solo argiloso.

4.2 Características Químicas dos Fertilizantes Granulados

Os fertilizantes granulados caracterizados quanto aos teores de N (em suas diferentes formas), K e S apresentaram resultados de acordo com a expectativa, e confirmado pelo laboratório do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento-MAPA (Ref. Laboratório Nacional de Referência Vegetal – LANARV - Goiânia – GO), conforme a Tabelas 3, indicando que as proporções foram prontamente atendidas e que o processo adotado não alterou significativamente a composição química, inicialmente, proposta pelo IPT.

Conforme a Tabela 5, os teores pseudo-totais de metais pesados encontrados nos fertilizantes granulados, foram inferiores aos preconizados pela legislação vigente, de acordo com INSTRUÇÃO NORMATIVA SDA Nº 28, 27 de Julho de 2007, do MAPA (Brasil 2007). Verifica-se que para maioria dos produtos avaliados as concentrações foram inferiores ao limite de detecção do método. Dessa forma, não existindo nenhuma limitação quanto às concentrações de metais pesados nos produtos testados para registro no MAPA.

Os fertilizantes granulados NK e NS apresentaram teores considerados elevados de Biureto (Tabela 4). Todos os fertilizantes apresentam teores acima dos preconizados pela legislação vigente do MAPA (Brasil, 2007), i.e, teores superiores a 1,5% de biureto.

Dentre as misturas granuladas a que apresentou o maior teor de biureto em sua composição foi o NK-1, composto apenas por uréia, apresentando 7% de biureto. Verifica-se que o fertilizante NK -1 foi o que teve a maior quantidade de biureto aplicado ($18,58 \text{ kg ha}^{-1}$, Tabela 5), e o fertilizante NK-3 foi o que apresentou a menor quantidade aplicada. O fertilizante NK-7 foi o que proporcionou a menor quantidade de potássio.

Tabela 5. Teores de pseudo-totais de metais pesados encontrados nas misturas granuladas e na matéria prima.

PRODUTO	Arsênio	Cádmio	Chumbo	Cromo	Mercurio
	(mg/kg)				
NK-1	N.D.	N.D.	0,25	4,22	N.D.
NK-3	N.D.	N.D.	0,19	3,31	N.D.
NK-5	N.D.	N.D.	0,31	3,83	N.D.
NK-7	N.D.	N.D.	0,73	1,02	N.D.
NK-9	N.D.	N.D.	0,81	1,75	N.D.
NK-11	N.D.	N.D.	0,67	2,84	N.D.
NS-1	N.D.	N.D.	0,23	3,31	N.D.
NS-3	N.D.	N.D.	1,03	7,53	N.D.
NS-5	N.D.	N.D.	50	1,81	N.D.
NS-7	N.D.	N.D.	0,43	2,50	N.D.
UR	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
L.M.	10,00	20,00	100,00	200,00	0,20
L.D.	0,10	0,25	0,10	0,25	0,04
L.Q.	0,25	0,50	0,50	0,50	0,10
BRANCO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Observações

L.D. Limite de Detecção do Método

L.Q. Limite de Quantificação do Método

N.D. Não Detectado Acima do Limite de Detecção

N.A. Não Aplicável

L.M. Limite Máximo na Legislação Vigente

Entre as misturas NK e NS as que aplicaram maiores quantidades de biureto ao solo, em kg ha^{-1} , em ordem decrescente, foram: NK-1; NS-3; NS-1; NS-5; NK-11; NK-9; NK-3; NK-7; NK-5, e NS-7. Os fertilizantes com maiores proporções de KCl possuem menor teor de N-total em sua composição (Tabela 3) e apresentaram menores teores de biureto. O produto

NS-3 apresentou 5% de biureto em sua composição, tendo o fertilizante granulado NS o maior teor de biureto.

Os produtos granulados não se enquadram nas especificações do MAPA, devido a alta concentração de biureto em sua composição, inviabilizando sua comercialização.

4.3 Eficiência da Câmara de Volatilização na Metodologia Utilizada

Os resultados de eficiência (N capturado / N aplicado) da câmara de volatilização são apresentados na figura 15, e mostram que com um tempo de coleta de 6 dias, houve uma recuperação de 76 % do N volatilizado (N-NH₃), contrastando, significativamente (P<0,05) do tempo de 2 dias em que a recuperação foi inferior (64%). Esses resultados demonstram, claramente, a necessidade de se recolher o N volatilizado por um período maior que 6 dias após a aplicação, com 76% de recuperação do N-aplicado, nas condições testadas.

A casa de vegetação apresenta exaustores que mantêm a circulação de ar interna e o sistema coletor de N-NH₃ é aberto. Dessa forma, se esperava que a eficiência fosse abaixo de 100%, sendo necessária uma calibração para identificar a eficiência local. Deve-se destacar que a eficiência obtida não representa as interações que o N aplicado sofre ao ser adicionado ao solo, uma vez que o substrato foi areia lavada sem N-disponível. Entretanto, expressa a real capacidade da câmara coletora de captar N-NH₃ volatilizada, pois a adição de NaOH, aumentando o pH a valores superiores a 7,0 provoca a total volatilização do N-NH₃.

Nas condições testadas, para se obter a quantidade real de N-NH₃ volatilizada do solo com uma eficiência na recuperação de 76%, deve ser aplicado o fator de 1,24.

$$Y = 1,24 X$$

Onde: Y é a quantidade real de N-NH₃ volatilizada e X é a quantidade de N-NH₃ absorvido pelo sistema coletor.

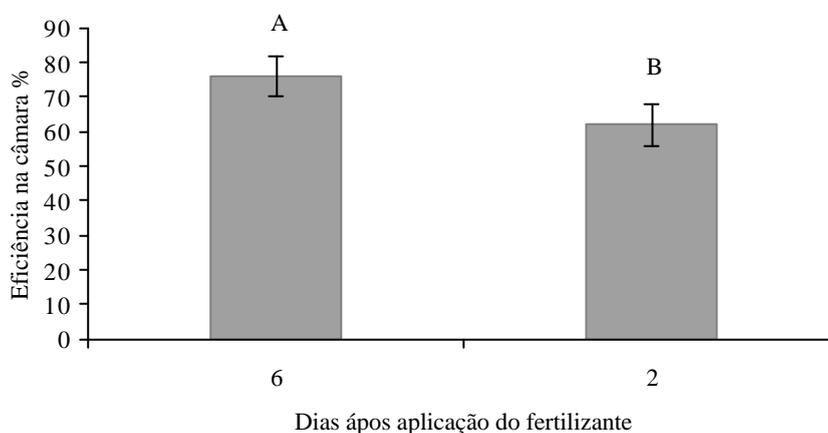


Figura 15. Eficiência da câmara coletora de amônia (SALE) na recuperação do N-NH₃ (%), proveniente do sulfato de amônio, aplicado em areia lavada com nebulização de NaOH 0,5N, nas condições estudadas, em tubos de PVC. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey ao nível de 5%.

4.4 Volatilização de N-NH₃ Proveniente dos Fertilizantes Granulados

4.4.1 Solo de textura arenosa

Os tipos de fertilizantes granulados, a forma de aplicação, e o pH do solo proporcionaram diferenças significativas ($P < 0,05$) sobre as perdas de N-NH₃ por volatilização, assim como a interação entre eles. A aplicação dos fertilizantes granulados em solo com textura arenosa, com pH 6,5, propiciou significativas perdas por volatilização de nitrogênio, quando comparados aos aplicados em solo com pH 5,5, com exceção de alguns fertilizantes NK quando incorporados e não houve diferenças estatísticas do SA entre os dois valores de pH (Tabela 6). Os resultados observados demonstram ainda efeito significativo ($P < 0,05$) da incorporação dos fertilizantes sobre a redução nas perdas por volatilização de nitrogênio total durante o período experimental, independente do produto aplicado, com exceção dos fertilizantes NK-3 e SA (Tabela 6).

Vários trabalhos demonstraram que a forma mais eficiente de reduzir as perdas por volatilização de N-NH₃ é pela a incorporação da uréia ao solo (Ernst e Massey, 1960; Overrein e Moe, 1967; Espironello et al., 1987; Trivelin et al., 2002). O controle das perdas pela incorporação da uréia, depende da textura, CTC e umidade dos solos e também a direção da movimentação de água no perfil do solo. Geralmente, a incorporação entre 5 a 10 cm de profundidade é suficiente para controlar as perdas de N-NH₃ (Anjos e Tedesco, 1976; Nelson, 1982; Cantarella et al., 1999), sendo essa uma conseqüência do maior contato entre os fertilizantes e as partículas do solo favorecendo a adsorção de N-NH₄⁺ pelas cargas negativas do solo. Além disso, as moléculas de N-NH₃ que migram do interior do solo em direção a atmosfera encontram sítios do solo com valores de pH inferiores aqueles existentes ao redor dos grânulos de uréia, e se transformam em N-NH₄⁺, o qual permanece na solução do solo ou é adsorvido eletrostaticamente às cargas negativas da fase sólida do solo.

As misturas granuladas NK-3, NK-5, NK-7, NK-9 e NK-11 apresentaram perdas por volatilização de nitrogênio de 33, 39, 43, 38 e 37% respectivamente, do total aplicado sobre a superfície do solo arenoso com pH 5,5, sendo estas significativamente superiores ($P < 0,05$) às perdas apresentadas pela testemunha (UR), demonstrando que, nas condições estudadas, o KCl não foi eficiente no controle das perdas de N-NH₃ (Figura 16), provavelmente pelo fato do KCl reduzir a adsorção de NH₄⁺, pela competição pelos sítios de carga negativa, entre o K⁺ e o NH₄⁺. Dessa forma, a maior concentração de N-NH₄⁺ na solução do solo favorecerá as PVN.

O NK-1 (100% de uréia), matéria prima das misturas granuladas, foi o que apresentou as menores perdas entre todos os fertilizantes NK, corroborando com a hipótese de que o KCl foi ineficiente na redução das perdas de N-NH₃, nas condições testadas.

Kong et al. (1991) observaram ligeiro aumento na volatilização de N-NH₃ em uma mistura de uréia com KCl utilizada à cana de açúcar sem despalha a fogo na Austrália. Segundo esses pesquisadores, o fenômeno ocorreu devido a alcalinidade presente no lote de KCl utilizado (pH 8,2 em solução). Em laboratório, Kiehl (1989) também obteve resultados semelhantes, onde os sais de potássio não foram efetivos na redução das perdas, chegando a aumentar em até 33% em relação a testemunha. Portanto, a adição de KCl à uréia não parece uma alternativa segura para o controle das perdas de N-NH₃.

Tabela 6. Perdas percentuais de N-NH₃ volatilizado do total aplicado, provenientes dos fertilizantes nitrogenados aplicados em colunas de solo sob diferentes formas de aplicação e pH.

Fontes ⁽¹⁾	Forma de aplicação	pH do solo			
		5,5		6,5	
		% N		% N	
NK-1	Superficial	26,5	A a	27,6	A a
	Incorporada	20,8	B a	7,2	B b
NK-3	Superficial	33,7	B b	42,5	A a
	Incorporada	40,4	A a	4,8	B b
NK-5	Superficial	39,5	A b	44,1	A a
	Incorporada	10,7	B b	28,9	B a
NK-7	Superficial	43,5	A a	43,5	A a
	Incorporada	34,1	B a	15,2	B b
NK-9	Superficial	38,5	A b	43,1	A a
	Incorporada	30,2	B a	27,7	B b
NK-11	Superficial	37,2	A b	45,0	A a
	Incorporada	22,5	B a	19,9	B b
NS-1	Superficial	22,3	A b	25,9	A a
	Incorporada	15,4	B b	16,9	B a
NS-3	Superficial	26,1	A b	38,8	A a
	Incorporada	4,6	B b	5,9	B a
NS-5	Superficial	29,3	A b	32,4	A a
	Incorporada	8,5	B b	10,7	B a
NS-7	Superficial	42,7	A a	43,6	A a
	Incorporada	14,2	B b	22,5	B a
UR	Superficial	18,0	A b	19,9	A a
	Incorporada	13,5	B b	16,7	B a
SA	Superficial	0,6	A a	0,5	A a
	Incorporada	0,6	A a	0,5	A a

⁽¹⁾ NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas colunas, não indicam diferenças entre a forma de incorporação para cada fonte nitrogenada, enquanto diferentes letras minúsculas, entre colunas, indicam diferenças entre o pH do solo, para cada fonte nitrogenada, à significância de 5% pelo teste Scott-Knott.

Os produtos NK-9 e NK-11 não apresentaram diferenças significativas entre outras misturas NK, mas podem estar apresentando reduções na taxa de hidrólise e um retardo nas perdas por volatilização do nitrogênio (Figura 20), provavelmente, devido a grande quantidade de KCl em suas composições (43 e 53% respectivamente, equivalente a 120 e 182 kg ha⁻¹, Tabela 5). Pequenas reduções na taxa de hidrólise e nas perdas de N-NH₃ são ocasionalmente relatadas, com o uso de altas doses de KCl (Kong et al. 1991), mas os efeitos são em geral, pouco significativos. A taxa de volatilização em função do tempo (Figura 20), demonstram que os picos de perdas ocorreram no terceiro dia após adubação, reforçando a possibilidade do KCl ter reduzido e atrasado a taxa de hidrólise e, conseqüentemente, a volatilização do nitrogênio, nas misturas granuladas NK-9 e NK11.

O SA foi o fertilizante que apresentou a menor perda por volatilização de N-NH₃, uma vez que não sofre volatilização de nitrogênio amoniacal em solos com o pH inferior a 7. Embora os fertilizantes UR, NS-1, NS-3, e NS-5 não tenham apresentado diferenças significativas (P<0,05) entre eles, a mistura granulada NS-1 (enriquecidas com sulfato de amônio à 40%, sem adição de água na fórmula), apresentou tendência à menores perdas. O sulfato de amônio estaria contribuindo como uma fonte adicional de prótons ao meio através da hidrólise do sal (Du Pleessis e Kroontje, 1964), neutralizando assim o efeito alcalinizante resultante da hidrólise da uréia e, conseqüentemente, reduzindo as perdas por volatilização do nitrogênio. Deve-se considerar também o efeito do SA sobre o processo de nitrificação e arraste de bases (Ca²⁺ e Mg²⁺) em profundidades pelo SO₄²⁻.

A mistura granulada NS-7 apresentou PVN de 43% do total aplicado (Figura 16), sendo esta significativamente superior (P<0,05) do que as perdas apresentadas pelos demais fertilizantes granulados NS, demonstrando que, o menor teor de sulfato de amônio, e a H₂O em sua composição potencializa as perdas de N-NH₃, podendo assim, estar favorecendo a hidrólise da uréia, aumentando as perdas nas condições estudadas.

A reação da hidrólise consome prótons (H⁺) e provoca a elevação do pH ao redor das partículas, assim, mesmo em solos ácidos, a uréia está sujeita a perdas de N por volatilização de N-NH₃ (Clóvis et al, 2005). Overrein e Moe (1967) verificaram que o pH do solo ao redor das partículas de fertilizantes subiu de 6,5 para 8,8 três dias após a adubação. Resultados semelhantes foram observados também em diferentes tipos de solo (Kissel et al, 1988). Assim, o sulfato de amônio aplicado ao solo tem característica de neutralização do pH do solo, principalmente ao redor das partículas de fertilizantes.

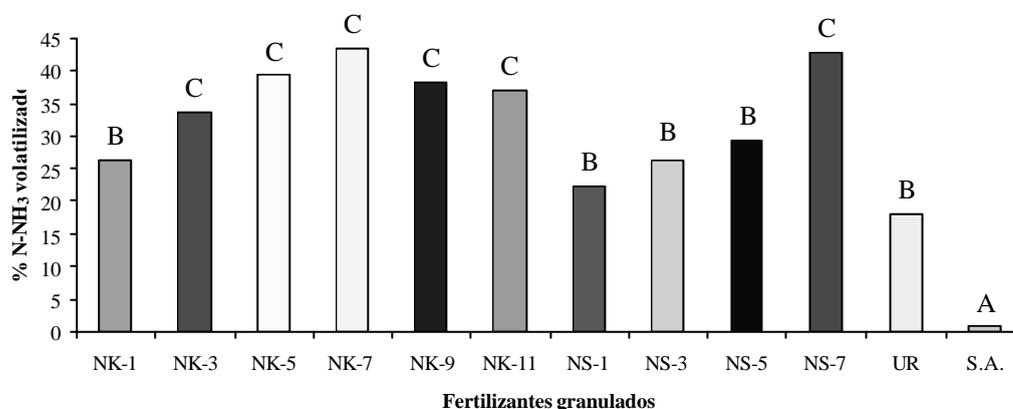


Figura 16. Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura arenosa, em pH 5,5 sem incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

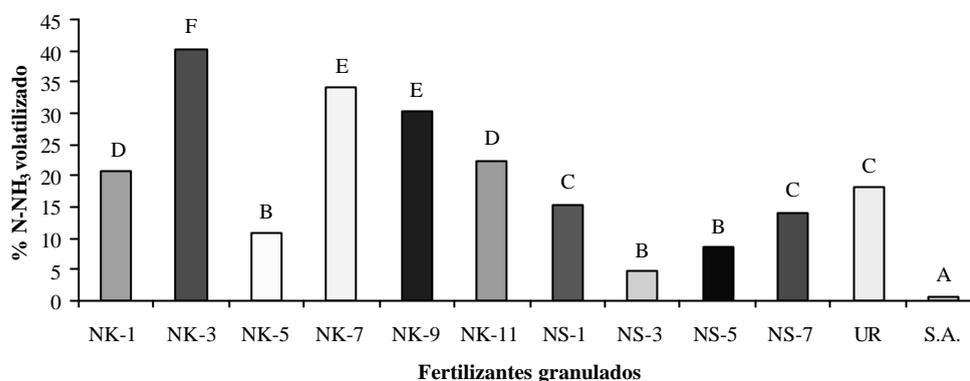


Figura 17. Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura arenosa, em pH 5,5 com incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

A incorporação dos fertilizantes granulados adicionados ao solo com pH 5,5 (Figura 17) reduziu as perdas por volatilização do nitrogênio de forma significativa ($P < 0,05$) com exceção dos fertilizantes NK-3 e SA (Tabela 6). Os elevados índices de volatilização observados em alguns produtos incorporados (NK-3, NK-7 e NK-9) possivelmente, se devam às condições experimentais favoráveis PVN, como a textura arenosa do solo (920 g kg^{-1} , Tabela 2) e sua reduzida capacidade de retenção de N-NH₃. Sendo assim, as aplicações em profundidade, nas condições estudadas não foram capazes de retardar as perdas por volatilização devido à baixa resistência do solo ao deslocamento da N-NH₃, uma vez que esta é retida através de determinados mecanismos físicos e químicos (Mortland, 1958) associados, principalmente, ao complexo de troca. De acordo com as Figuras 20 e 21, os picos de PVN para os produtos NK e NS quando incorporados ao solo, foram semelhantes aos aplicados sob a superfície do solo, demonstrando a baixa resistência do solo ao deslocamento da N-NH₃.

Em relação ao efeito da calagem sobre as perdas de N-NH₃ por volatilização, observa-se que todos os fertilizantes granulados NK e NS aplicados na superfície em solo com calagem (pH 6,5) tiveram as perdas elevadas (Tabela 6), diferindo significativamente ($P < 0,05$) da aplicação dos fertilizantes em solo com pH 5,5. Esses resultados podem ser explicados pela menor concentração de íons H⁺ no solo com calagem, uma vez que nesta condição de pH do solo, a N-NH₃ resultante da hidrólise da uréia é preferencialmente perdido para a atmosfera por volatilização, ao invés de combinar-se com íons H⁺ da solução do solo ou com íons H⁺ dissociáveis do complexo coloidal, resultando na formação de íon N-NH₄⁺. Sendo assim, valores elevados de pH proporcionam maiores perdas por volatilização quando a uréia é aplicada em superfície (Byrnes, 2000), já que a disponibilidade de íons H⁺ é limitada. Como a calagem realizada elevou o pH para 6,5 torna-se de fácil compreensão a perda quando comparado aos tratamentos sem calagem, onde o pH era de 5,5 (pH natural do solo).

Nos fertilizantes aplicados em solo com pH 6,5 sobre a superfície do solo (Figura 18), os produtos com KCl provavelmente não causaram redução na taxa de hidrólise e também efeito pelas diferenças na proporção de KCl nos produtos, não havendo diferenças

significativas entre as PVN, por todas as misturas NK. O NK-1 aplicado em pH 6,5 não apresentou diferença significativa ($P < 0,05$) de volatilização em relação ao solo com pH 5,5 (Tabela 6). A UR apresentou menor PVN em relação aos demais fertilizantes, diferindo, estatisticamente. O NK-1 é constituído de uréia pura e apresenta 7% de biureto em sua composição, o que, provavelmente, esteja influenciando positivamente a atividade da enzima urease responsável pela hidrólise da uréia, resultando em maiores PVN, em comparação com a UR. A volatilização do NK-1 foi maior que a UR, apresentando perdas de $N-NH_3$ de 27 e 19% do total aplicado, respectivamente.

XUE et al. (2003) concluíram que o biureto tem um efeito iniciador da mineralização de nitrogênio no solo, disponibilizando quantidade deste nutriente capaz de estimular o crescimento inicial da biomassa microbiana do solo, quando aplicado em baixas concentrações, dessa forma, o biureto pode estar estimulando as atividades dos microrganismos do solo, resultando em maiores perdas em comparação com a UR.

Os fertilizantes que apresentaram as menores PVN em solo com pH 6,5 sem incorporação (Figura 18), foram: SA; UR; NS-1, e NK-1, sendo as perdas acumuladas de 1, 20, 25 e 27% do total de N aplicado, respectivamente. A UR, NS-1 e NK-1 não apresentaram diferenças significativas entre eles, sendo as PVN reduzidas pelo fertilizante NS-1 em relação às outras fontes NS, devido a maior concentração do sulfato de amônio, que teria causado um efeito neutralizante da hidrólise da uréia e reduzindo as perdas em relação às outras misturas NS, as quais apresentaram menores quantidade de sulfato de amônio e/ou H_2O em suas composições.

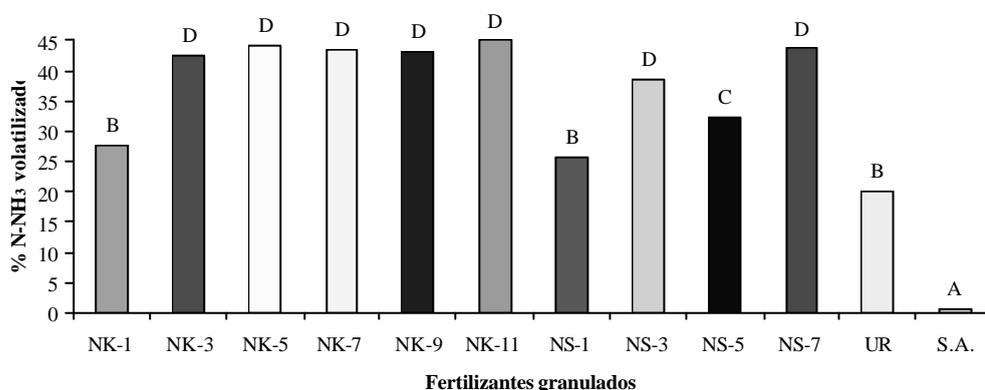


Figura 18. Perdas percentuais acumuladas de $N-NH_3$ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura arenosa, em pH 6,5 sem incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H_2O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% $(NH_4)_2SO_4$ 40%; NS-3: uréia 80% $(NH_4)_2SO_4$ 20%; NS-5: uréia 60% $(NH_4)_2SO_4$ 40% + H_2O ; NS-7: uréia 80% $(NH_4)_2SO_4$ 20% + H_2O ; UR: uréia comercial 100%; SA: $(NH_4)_2SO_4$ 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

A aplicação dos fertilizantes em solo com pH 6,5, com incorporação, reduziram as PVN de forma significativa em relação a maioria dos produtos NK e NS aplicados sem incorporação (Tabela 6). Comparando as PVN dos produtos NK, observa-se, na Figura 19, que os fertilizantes NK-1 e NK-3, com 0 e 27% de KCl, respectivamente, apresentaram menores PVN em relação os demais fertilizantes, ratificando que o KCl não foi eficiente na redução das PVN. Na Figura 19, verifica-se que o SA apresentou menor PVN, essas perdas foram semelhantes a testemunha absoluta, sendo seu valor menor que 1% do total aplicado,

confirmando que o SA, praticamente, não apresentou perdas por volatilização de N-NH₃ em solo com pH 6,5.

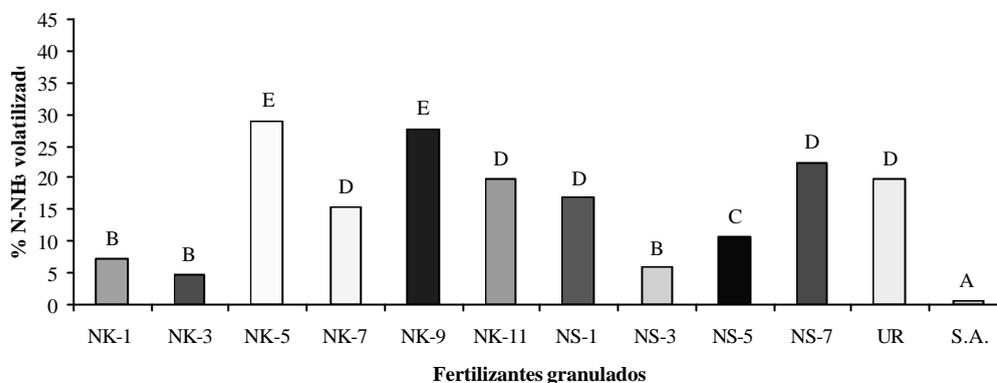


Figura 19. Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura arenosa, em pH 6,5 com incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

Analisando a taxa de volatilização (mg N-NH₃ dia⁻¹) dos produtos NK (Figura 20), observa-se que as maiores PVN ocorrem após 48 horas da aplicação nos fertilizantes UR, NK-1, NK-3, NK-5 e NK-7. Para os fertilizantes granulados NK-9 e NK-11 o pico de PVN ocorreu após 72 horas da aplicação. Diversos autores encontraram taxas de perda de N-NH₃ semelhantes (Rodrigues e Kiehl, 1986; Guedes, 2002; Martha Júnior, 2003; Barbieri e Echeverría, 2003; Da Ros e Aita, 2005; Duarte, 2006; Hu et al., 2007 e Werneck, 2008). Cantarella (2007), relata que os picos de perdas, normalmente, ocorrem dois a quatro dias após aplicação da uréia.

A taxa de PVN sofreu possivelmente influência da rápida e elevada taxa de evaporação da umidade do solo causada pelo sistema de climatização, o que provocou ventos pelo sistema exaustão e pelas temperaturas no interior da casa de vegetação (Figura 11), sendo, possivelmente, esse o motivo das PVN ocorrerem, praticamente, somente até o sétimo dia após aplicação, havendo declínio das PVN após seu pico até o sétimo dia quando então estabilizaram e se assemelharam as PVN ocorridas no tratamento testemunha absoluta (sem adição de N). Nos primeiros 7 dias após a aplicação dos fertilizantes ocorreram mais que 90% da volatilização do N aplicado. Resultados semelhantes foram observados em 6 dias após aplicação da uréia por Cantarella et al., (2003).

Os resultados na Figura 20 confirmam a possível redução na taxa de hidrólise e o retardo nas PVN dos produtos NK-9 e NK-11, contribuindo na liberação mais lenta de N. Estes fertilizantes apresentaram os picos de PVN no terceiro dia após adubação, corroborando que a redução na taxa de hidrólise levou a menores PVN devido a grande quantidade de potássio aplicado. Os fertilizantes NK-11 e NK-9, com maiores teores de K₂O, foram os que tiveram maiores quantidades de K₂O aplicados, 182 e 120 kg ha⁻¹, respectivamente. O fertilizante NK-7 foi o que apresentou menor quantidade de potássio adicionado (29 kg ha⁻¹), proporcionando seu pico de PVN após 48 horas após aplicação.

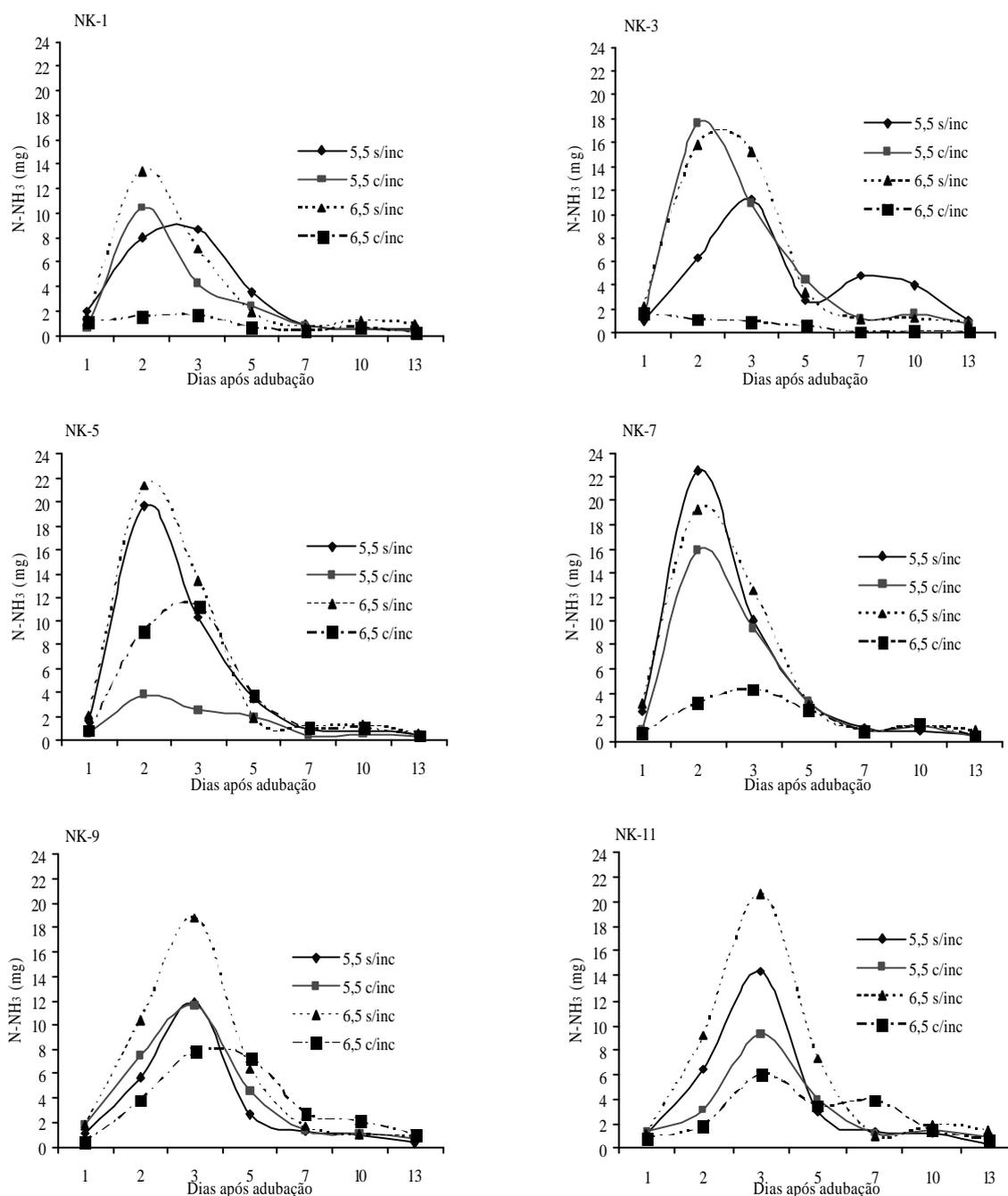


Figura 20. Perdas diárias de amônia (N-NH₃) por volatilização, proveniente da aplicação dos produtos NK (120 kg/ha⁻¹), em colunas de solo (Planossolo Háplico, 0-20cm), sob 2 valores de pH e duas formas de incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%.

De acordo com a Figura 21 o pico de perda por volatilização do nitrogênio da UR foi após 48 horas a aplicação dos fertilizantes, e os demais fertilizantes que contêm sulfato de amônio em suas composições apresentaram, na maioria dos casos, picos de perdas de 72 horas após a aplicação, sendo essa liberação mais lenta decorrente do sulfato de amônio, causando acidificação ao meio.

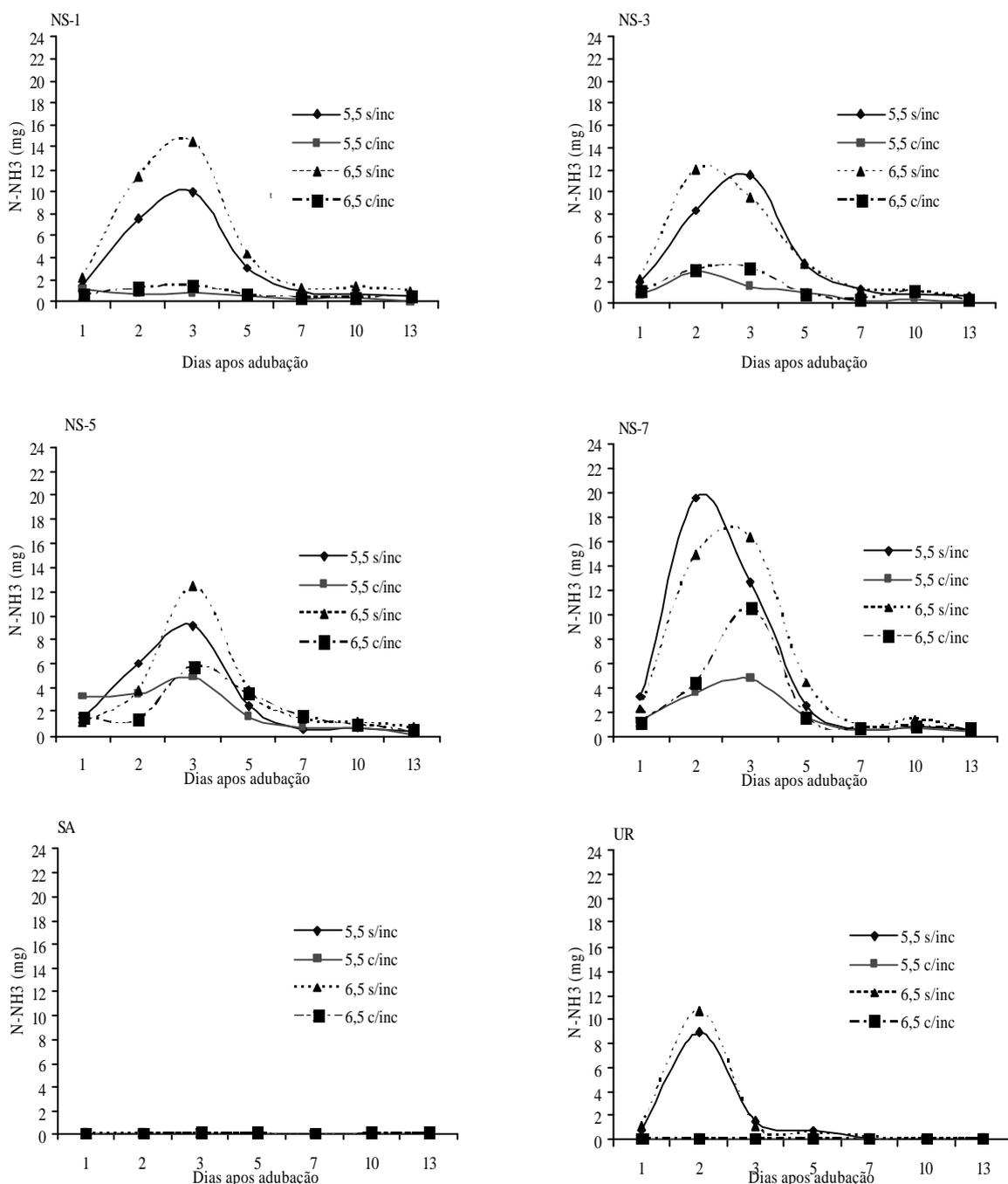


Figura 21. Perdas diárias de amônia (N-NH₃) por volatilização, proveniente da aplicação dos produtos NS, UR e SA (120 kg/ha⁻¹), em colunas de solo (Planossolo Háplico, 0-20cm), sob 2 valores de pH e duas formas de incorporação.

Conforme: NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%.

Além da umidade e da temperatura em casa de vegetação, o solo de textura arenosa (920 g kg⁻¹, Tabela 2) apresenta baixa capacidade de troca catiônica (CTC), favorecendo a volatilização de N-NH₃ para a atmosfera (Byrnes, 2000). Esses fatores favoreceram as perdas de N-NH₃, uma vez que o solo é fator determinante na capacidade de retenção de N-NH₄⁺ no sistema solo-planta. A textura arenosa do solo (Tabela 2), especialmente devido sua baixa capacidade de retenção de água, associada às altas taxas de evaporação causada pela

ventilação na casa de vegetação, também favoreceu o fluxo de água e $N-NH_3$ para a atmosfera.

Nesse estudo, o solo já se encontrava úmido no momento da adubação (70% da CC), o que pode ter contribuído para a difusão descendente da uréia e do biureto. A textura arenosa do solo também contribuiu para que essa difusão ocorresse. Essa difusão retardaria a taxa de volatilização em condições de baixa a média evaporação, porém, a ventilação gerada pelos exaustores da casa de vegetação e as temperaturas em seu interior, aumentaram a velocidade de secamento do solo, acarretando em perdas significativas nas 24 horas após a adubação. As perdas de $N-NH_3$ têm relação direta com a velocidade e duração do processo de secagem do solo (Fenn e Escarzaga, 1976; Gasser, 1964; Kresge e Satchell, 1960 e Volk, 1966, citados por Urquiaga et al; 1989), ou seja, o nível de perda de $N-NH_3$ do solo correlaciona-se positivamente com o ritmo de evaporação (Corsi, 1984) e quantidades apreciáveis de $N-NH_3$ são perdidas do solo, somente, quando há perda de água (Martin e Chapman, 1951; citados por Cantarella, 2007), sendo as perdas de $N-NH_3$ favorecidas por altas temperaturas e pelo vento (Cantarella, 2007; Martha Júnior, 2003). Perdas de N por volatilização de 74% do N^{15} aplicado em cobertura na forma de uréia foram atribuídas, além do elevado pH, às correntes de vento geradas pelo sistema de exaustão da casa de vegetação (Alves, 2006).

4.4.2 Solo de textura argilosa

Não houve diferenças entre os fertilizantes granulados NK e NS aplicados no solo de textura argilosa (Figuras 22, 23, 24 e 25). A aplicação dos fertilizantes granulados na superfície do solo propiciou maiores perdas por volatilização do N do que quando eles foram incorporados, diferindo significativamente ($P < 0,05$), na maioria dos casos (Tabela 7).

Quando a uréia foi aplicada sobre a superfície do solo, entretanto, apenas uma fração equivalente a 1,8 e 3,5% do N adicionado foi perdida na forma de $N-NH_3$ em solos com pH 5,5 e 6,5, respectivamente. Esta perda é muito menor do que as observadas por diversos autores. Essas diferenças podem estar relacionadas com as características do solo argiloso, principalmente, o alto teor de argila do solo (490 g kg^{-1} , Tabela 2), a capacidade de troca de cátions. Solos com alta CTC apresentam grande capacidade de retenção de $N-NH_4^+$ (Wang e Alva, 2000), o que dificulta a volatilização de $N-NH_3$, sendo assim, menor em solos argilosos do que em solos arenosos (Silva et al., 1995). Além disso, as condições mais controladas de temperatura e umidade no experimento com solo argiloso (Figura 12), podem ter contribuído para a redução das perdas de $N-NH_3$, pela menor taxa de evaporação do solo em relação ao solo arenoso.

Tabela 7. Perdas percentuais de N-NH₃ volatilizado do total aplicado, provenientes dos fertilizantes nitrogenados aplicados em colunas de solo sob diferentes formas de aplicação e pH.

Fontes ⁽¹⁾	Forma de aplicação	pH do solo			
		5,5		6,5	
		% N		% N	
NK-1	Superficial	2,57	A a	2,6	A a
	Incorporada	1,35	B b	1,8	B a
NK-3	Superficial	2,60	A a	2,7	A a
	Incorporada	1,54	B b	2,0	B a
NK-5	Superficial	2,08	A a	2,2	A a
	Incorporada	1,77	A b	2,2	A a
NK-7	Superficial	1,87	A b	2,6	A a
	Incorporada	1,55	A a	1,3	B a
NK-9	Superficial	2,49	A a	2,7	A a
	Incorporada	1,61	B b	2,4	A a
NK-11	Superficial	2,34	A b	3,5	A a
	Incorporada	1,51	B a	1,2	B a
NS-1	Superficial	1,80	A b	2,7	A a
	Incorporada	1,80	A a	1,1	B b
NS-3	Superficial	1,80	A b	3,5	A a
	Incorporada	0,90	B b	2,2	B a
NS-5	Superficial	1,80	A b	2,8	A a
	Incorporada	1,00	B b	1,7	B a
NS-7	Superficial	2,50	A a	2,8	A a
	Incorporada	1,10	B b	1,7	B a
UR	Superficial	1,80	A b	3,5	A a
	Incorporada	0,70	B b	1,3	B a
SA	Superficial	1,60	A b	2,3	A a
	Incorporada	1,60	A a	1,5	B a

⁽¹⁾ NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas colunas, não indicam diferenças entre a forma de incorporação para cada fonte nitrogenada, enquanto diferentes letras minúscula, entre colunas, indicam diferenças entre o pH do solo, para cada fonte nitrogenada, à significância de 5% pelo teste Scott-Knott.

Verifica-se nas Figuras 22 e 23 que não houve diferenças estatísticas entre as perdas por volatilização do nitrogênio dos fertilizantes granulados NK e NS e pelas testemunhas. Os fertilizantes NK e NS enriquecido com cloreto de potássio e sulfato de amônio, em diferentes proporções não reduziram as perdas de N-NH₃, em solo argiloso com pH 5,5, independente da forma de incorporação. Em relação ao efeito da calagem sobre a perda de N-NH₃ por volatilização, observa-se que a maioria dos fertilizantes aplicados em solo com calagem tiveram tendência de perdas elevadas, na maioria dos casos diferindo significativamente (P<0,05) da aplicação dos fertilizantes em solo com pH 5,5 (Tabela 7), o que pode ser explicado pela menor concentração de íons H⁺ no solo com calagem, uma vez que nesta condição de pH do solo, a N-NH₃ resultante da hidrólise da uréia é preferencialmente perdida para a atmosfera por volatilização.

Analisando as perdas acumuladas de N-NH₃ em solo com pH 6,5, verifica-se nas Figuras 24 e 25 que não houve diferença significativa entre os fertilizantes, independente da incorporação. O NK-11 e UR apresentaram tendência de maiores perdas de N-NH₃ entre os fertilizantes granulados NK. Entre os fertilizantes NS, o NS-3 e a UR apresentaram tendência de elevadas perdas por volatilização do nitrogênio em comparação aos demais fertilizantes NS, porém sem diferenças significativas.

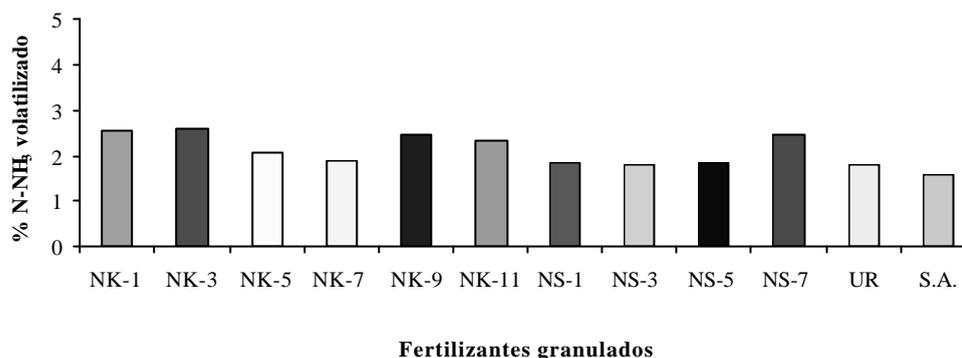


Figura 22. Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura argilosa, em pH 5,5 sem incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

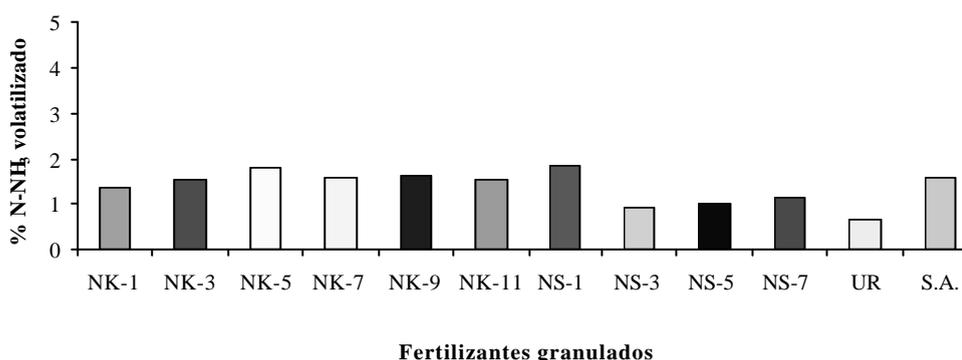


Figura 23. Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura argilosa, em pH 5,5 com incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

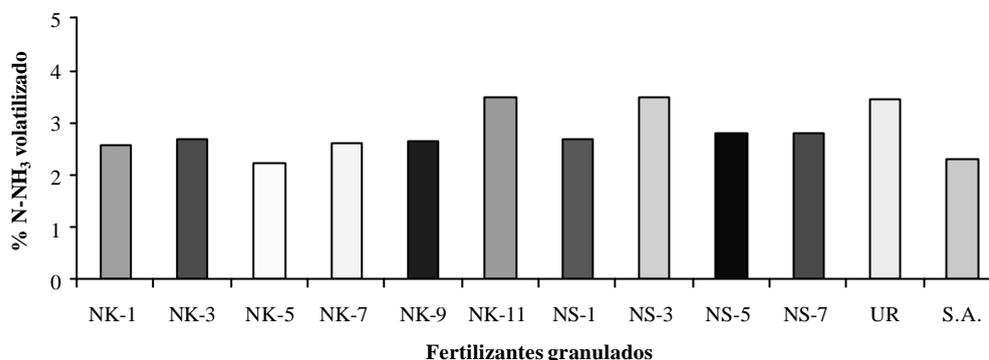


Figura 24. Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura argilosa, em pH 6,5 sem incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

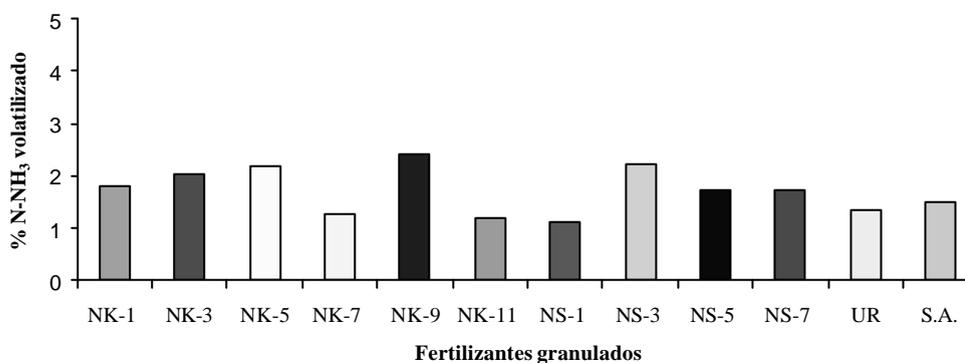


Figura 25. Perdas percentuais acumuladas de N-NH₃ volatilizada durante 21 dias, provenientes dos fertilizantes NK e NS adicionados ao solo de textura argilosa, em pH 6,5 com incorporação.

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

4.5 Lixiviação de N Proveniente dos Fertilizantes Granulados

4.5.1 Solo de textura arenosa

Os efeitos do pH do solo e da forma de aplicação dos fertilizantes sobre a lixiviação de N-mineral variaram com o tipo de fertilizante. No solo de textura arenosa, a interação entre estes dois fatores influenciou a quantidade total de nitrogênio lixiviada pelos fertilizantes estudados. A lixiviação aumentou com as aplicações dos fertilizantes nitrogenados, e foi mais intensa quando os mesmos foram aplicados com incorporação em solo com pH 6,5 quando comparada à aplicação na superfície do solo em pH 5,5. No tratamento sem aplicação de N, a lixiviação total foi de 13 mg de N coluna⁻¹. Isto, provavelmente, ocorreu pela contribuição do N proveniente da matéria orgânica do solo (10,2 g kg⁻¹, Tabela 1), que possivelmente, foi mineralizado pelos microrganismos do solo durante os primeiros 21 dias experimento.

As quantidades de N lixiviada dos fertilizantes granulados NK e NS, aplicados sob duas formas de incorporação e dois valores de pH do solo, são apresentada na Tabela 8. Verifica-se que em valores de pH do solo a 5,5 sem incorporação, o SA apresentou a maior perda de N, sendo estas significativamente superiores ($P < 0,05$) às perdas apresentadas pelos demais produtos, seguida da UR. Em pH 6,5 a maior perda foi oriunda da UR, seguido do SA. Dentre os fertilizantes NK, o NK-3 e NK-1 foram os que apresentaram as menores perdas de N, em ambos os valores de pH do solo. Todos os produtos aplicados em solo com pH 6,5 apresentaram perdas de N estatisticamente superiores ($P < 0,05$) quando comparados à aplicação em solo com pH 5,5, independente da forma de incorporação, com exceção do SA quando aplicada na superfície do solo e da UR que também não apresentou diferença significativa quando aplicado sob incorporação (Tabela 8).

O fertilizante granulado NS-1 quando aplicado na superfície do solo em solo com pH 5,5 apresentou perda de N significativamente inferior ($P < 0,05$) às perdas apresentadas pelos demais fertilizantes. Os fertilizantes NK-1 e NK-3 apresentaram a menor perda por lixiviação em pH do solo 6,5 (Tabela 8).

Quando os fertilizantes foram aplicados nas colunas de solo com pH 6,5, a lixiviação foi significativamente maior em comparação ao solo com pH 5,5. Estes resultados ocorreram, provavelmente, devido ao aumento no teor de nitrato nas colunas com aplicação de calcário. Segundo Curtin e Smille (1983), a elevação do pH incrementa as taxas de nitrificação. Em estudo semelhante, Azevedo et al. (1995) encontraram relação significativa entre a concentração de N-NO_3^- e Ca^{+2} no lixiviado. Possivelmente, pode ter ocorrido à formação de nitrato de cálcio ($\text{Ca(NO}_3)_2$) e sua posterior dissociação como íons de Ca^{+2} e N-NO_3^- .

O calcário aumenta o pH do solo e as cargas negativas na superfície das partículas, o que intensifica a taxa de nitrificação e o movimento subsequente de nitrato via percolação. Azevedo et al. (1995) fazem menção a McLnmes e Fillery (1989) quanto à dependência linear entre as taxas de pH do solo e o processo de nitrificação, podendo as diferenças na lixiviação entre as colunas de solos com calcário e sem calcário resultarem de diferenças nas taxas de nitrificação, proveniente de N residual do solo, como também dos fertilizantes granulados NK e NS. O predomínio de N na forma de N-NO_3^- , em valor de pH 6,5, pode ser constatado pelos resultados da Tabela 10, onde em 90% das situações avaliadas, o N-NO_3^- , em pH 6,5 foi maior em comparação ao solo com pH 5,5.

Tabela 8. Nitrogênio mineral lixiviado do total aplicado (% N coluna⁻¹), dos fertilizantes NK e NS aplicados sob diferentes formas de aplicação e valores de pH no solo de textura arenosa.

produto	sem incorporação				com incorporação			
	pH 5,5		pH 6,5		pH 5,5		pH 6,5	
N (%) lixiviado.....							
NK-1	19	D b	22	E a	25	F b	32	F a
NK-3	18	D b	24	E a	23	F b	29	F a
NK-5	21	D b	29	D a	42	C b	48	C a
NK-7	18	D b	28	D a	33	E b	38	E a
NK-9	28	C b	32	D a	36	D b	42	D a
NK-11	29	C b	37	C a	33	E b	44	D a
NS-1	13	E b	34	C a	22	F b	31	F a
NS-3	20	D b	30	D a	25	F b	39	E a
NS-5	21	D b	27	D a	30	E b	37	E a
NS-7	19	D b	33	C a	26	F b	36	E a
UR	55	B b	80	A a	80	A a	84	B a
SA	63	A a	61	B a	72	B b	94	A a

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas colunas, não indicam diferenças entre os fertilizantes, enquanto diferentes letras minúsculas, para cada forma de incorporação entre as colunas, indicam diferenças entre o pH do solo à significância de 5% pelo teste Scott-Knott.

Observa-se que quando os fertilizantes foram incorporados o SA apresentou as maiores perdas de N, em pH do solo 6,5, diferindo significativamente dos demais produtos. Em pH do solo 5,5 a UR apresentou a maior perda por lixiviação, seguida do SA. Quando as misturas granuladas NK e NS foram incorporadas ao solo, em pH 5,5, o NS-1, NK-3, NK-1, NS-3 e NS-7 apresentaram perdas de 22, 23, 25, 25 e 26% do total aplicado, perdas estas significativamente inferiores ($P < 0,05$) em relação a demais misturas granuladas. Em pH do solo 6,5 os fertilizantes granulados que apresentaram as menores perdas por lixiviação também foram o NK-3, NS-1 e NK-1.

De acordo com a Tabela 9, quando os fertilizantes foram incorporados ao solo, a lixiviação foi estatisticamente superior ($P < 0,05$), em comparação à lixiviação resultante da aplicação superficial dos fertilizantes.

O aumento das perdas de N por lixiviação obtida com a incorporação do N-fertilizante ao solo, em relação à aplicação superficial, estão de acordo com os resultados obtidos por Sampaio e Salcedo, (1993) e Sangoi et al., (2003), onde a mineralização do N nativo do solo quase dobrou com a incorporação da uréia ao solo. Além disso, as perdas de N-NH₃ por volatilização são potencialmente maiores quando os fertilizantes são aplicados em superfície. Elevadas perdas de N por lixiviação, principalmente, quando o fertilizante foi incorporado ao solo, também foram observada por Camargo et al., (1997) em solo argiloso.

A lixiviação máxima de N foi observada na primeira coleta de N-lixiviado, estando de acordo com as perdas encontradas por Ernani et al. (2001) e Araújo et al. (2003). Neste trabalho, aplicou-se o N na forma de uréia + KCl e uréia + sulfato de amônio, havendo, um período de 21 dias necessário para a reação de oxidação e formação do NO₃⁻. Binkley et al. (1999) afirmam que em condições de campo, a oxidação de N-NH₄⁺ à N-NO₃⁻ ocorre num prazo de semanas ou meses. No presente estudo, embora em casa de vegetação, observa-se que tal reação pode ter ocorrido mais rapidamente. Pelos resultados, verifica-se que a transformação da uréia em N-NO₃⁻ pode ter ocorrido durante os 21 dias do experimento de volatilização para a UR e SA, principalmente.

A UR e o SA apresentaram altas perdas de N por lixiviação nas colunas de solo, em relação os fertilizantes granulados NK e NS, provavelmente, essas diferenças sejam devido a menor granulometria da UR e do SA, causando uma solubilização mais rápida desses fertilizantes, fazendo com que as reações de oxidação sejam mais rápidas e intensas do que nos fertilizantes granulados, favorecendo a lixiviação, outro fator também, pode ser a ausência de biureto nesses fertilizantes, estimulada pela baixa CTC e a reduzida perda por volatilização apresentada por esses produtos. Assim, a maior parte do N permaneceu na solução do solo, sendo carregada pelos fluxos descendentes de água nas colunas de solo. Além disso, a menor capacidade de armazenamento de água deste solo deve ter contribuído para exaurir o N adicionado.

Os resultados reforçam as observações feitas por Ernami (1999) e Bortolini (2000) de que solos arenosos apresentam maior facilidade de perdas por lixiviação de nitrato, e devem receber fertilização nitrogenada em maiores doses e números de aplicações que nos solos argilosos. Neste sentido, Sanchez (2000) verificou que 88% do N aplicado na alface não foi recuperado num solo com mais de 950g kg⁻¹ de areia, proporcionando grande perda de N através da lixiviação. Os altos valores de perda de N ao final do período experimental reforçam o conceito de que a adubação nitrogenada em solos arenosos deve ser realizada de forma criteriosa e parcelada, devido as expressivas perdas por lixiviação.

As misturas granuladas aplicadas no solo arenoso com 10,2 g kg⁻¹ C-org (Tabela1), apresentam altos teores de biureto em suas composições, provavelmente, esta característica esteja também influenciando negativamente a nitrificação do N e contribuindo para as baixas perdas de N observados, conforme pode ser verificado na Tabela 10 .

XUE et al. (2003) verificaram que o biureto tem um efeito iniciador da mineralização de nitrogênio no solo, disponibilizando quantidades deste nutriente capaz de estimular o crescimento inicial da biomassa microbiana do solo, quando aplicado em baixas concentrações. Em concentrações mais elevadas o biureto pode atuar como um fertilizante nitrogenado de liberação lenta, a depender do tipo de solo.

Estudos também comprovam influência do biureto na nitrificação do N do solo. Bhargava e Ghosh (1976) reportaram que o biureto retardou a nitrificação da uréia e que o grau de retardo relaciona-se diretamente com a concentração de biureto na uréia. Sahrawat (1977) observou que o biureto não afeta diretamente a hidrólise da uréia, mas sim inibe, temporariamente, a conversão de N-NH₄⁺ para N-NO₃⁻ e a subsequente oxidação de N-NO₂⁻ para N-NO₃⁻. Low e Piper (1970), entretanto, encontraram efeitos não detectáveis do biureto sobre a nitrificação de nitrogênio proveniente de uréia em três tipos de solos da Inglaterra.

Tabela 9. Médias do N-mineral lixiviado do total aplicado (mg coluna^{-1}), dos produtos NK e NS aplicados sobre solo arenoso com diferentes formas de aplicação, independente do pH do solo.

produto	sem incorporação		com incorporação		Média geral	
N (mg) lixiviado.....					
NK-1	19,53	D b	27,63	F a	23,58	E
NK-3	20,09	D b	25,11	F a	22,60	E
NK-5	23,95	D b	43,28	C a	33,62	C
NK-7	21,81	D b	33,56	E a	27,68	D
NK-9	28,90	C b	37,41	D a	33,16	C
NK-11	31,46	C b	37,51	D a	34,49	C
NS-1	22,23	D b	25,50	F a	23,87	E
NS-3	24,31	D b	30,11	E a	27,21	D
NS-5	23,52	D b	32,22	E a	27,87	D
NS-7	25,25	D b	29,89	E a	27,57	D
SA	59,88	B b	78,29	B a	69,08	B
UR	64,97	A b	79,53	A a	72,25	A
Média	30,49		40,00		35,25	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas colunas, não indicam diferenças entre os fertilizantes, enquanto diferentes letras minúsculas, entre colunas, indicam diferenças entre forma de incorporação à significância de 5% pelo teste Scott-Knott.

4.5.2 Teores de N mineral no solo ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^- + \text{N-NH}_4^+$)

Os teores residuais de N-mineral ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^- + \text{N-NH}_4^+$) no solo de textura arenosa, resultante da aplicação dos fertilizantes granulados NK e NS sob duas formas de aplicação e dois valores de pH do solo, encontram-se na Tabela 10. Verifica-se que quando os fertilizantes foram aplicados em solo com pH 6,5, os teores residuais de N-NH_4^+ e N-NO_3^- foram maiores para todos os fertilizantes granulados, com exceção dos produtos NK-7, NK-9 e NK-11, aplicados na superfície do solo. Isto ocorreu, provavelmente, devido ao solo com pH 6,5, que intensificou o processo de nitrificação, com o aumento da atividade das bactérias nitrificadoras (nitrobacter e nitrossomonas), podendo as diferenças entre as colunas de solos com calcário e sem calcário, resultarem de diferenças nas taxas de nitrificação, proveniente de N residual do solo, como também dos fertilizantes granulados NK e NS.

O pH é um dos fatores mais importantes durante o processo de nitrificação de N, isto foi comprovado por Morrill e Dawson (1967). Em estudo desenvolvido por esses autores, onde avaliaram a nitrificação de 116 solos dos Estados Unidos submetidos em pH que variaram de 4,4 a 8,8, observaram diferentes comportamentos da nitrificação em função dos pH. Solos que apresentavam pH entre 5,01 e 6,38, oxidavam rapidamente o N-NH_4^+ a N-NO_2^- em N-NO_3^- , diferentemente dos solos que apresentaram pH menor, onde o N-NH_4^+ era oxidado a NO_3^- lentamente, e em pH maiores o N-NH_4^+ era oxidado a N-NO_2^- que se acumulava por longos períodos antes de oxidar a N-NO_3^- .

Neste trabalho, aplicou-se o N nas colunas de solo, havendo, um período de 21 dias necessário para a reação de oxidação e formação do N-NO_3^- . Binkley et al. (1999) afirmam que em condições de campo, a oxidação de N-NH_4^+ à N-NO_3^- ocorre num prazo de semanas ou meses. No presente estudo, embora em casa de vegetação, observa-se que tal reação pode ocorrer mais rapidamente. Pelos resultados, verifica-se que a transformação da uréia em N-NO_3^- pode ter ocorrido durante os 21 dias do experimento de volatilização para os fertilizantes granulados.

De acordo com a Tabela 10, quando os fertilizantes granulados foram incorporados ao solo, nos dois valores de pH do solo, os teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- foram maiores que os observados quando aplicados na superfície do solo para maioria dos produtos, com exceção do NK-7, NK-9 e NK-11.

Tabela 10. Teores residuais de N-NH_4^+ e $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ (mg coluna⁻¹), dos produtos NK e NS aplicados sobre solo arenoso, com diferentes formas de aplicação e pH.

Fonte	pH	Forma incorporação	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	total
		% N coluna ⁻¹		
NK-1	5,5	superficial	5	8	13
NK-1	6,5	superficial	9	9	19
NK-1	5,5	incorporado	10	10	19
NK-1	6,5	incorporado	19	15	35
NK-3	5,5	superficial	2	2	5
NK-3	6,5	superficial	15	7	22
NK-3	5,5	incorporado	5	3	8
NK-3	6,5	incorporado	13	15	28
NK-5	5,5	superficial	5	3	9
NK-5	6,5	superficial	10	5	14
NK-5	5,5	incorporado	8	9	16
NK-5	6,5	incorporado	15	12	27
NK-7	5,5	superficial	11	7	18
NK-7	6,5	superficial	8	5	13
NK-7	5,5	incorporado	8	9	16
NK-7	6,5	incorporado	11	14	25
NK-9	5,5	superficial	17	1	18
NK-9	6,5	superficial	14	9	22
NK-9	5,5	incorporado	4	4	8
NK-9	6,5	incorporado	12	15	27
NK-11	5,5	superficial	11	10	21
NK-11	6,5	superficial	9	7	16
NK-11	5,5	incorporado	4	6	10
NK-11	6,5	incorporado	8	9	17
NS-1	5,5	superficial	12	12	24
NS-1	6,5	superficial	14	6	20
NS-1	5,5	incorporado	9	8	17
NS-1	6,5	incorporado	14	18	32
NS-3	5,5	superficial	10	7	16
NS-3	6,5	superficial	17	12	29
NS-3	5,5	incorporado	11	7	19
NS-3	6,5	incorporado	12	12	24
NS-5	5,5	superficial	6	4	10
NS-5	6,5	superficial	17	8	25
NS-5	5,5	incorporado	6	5	12
NS-5	6,5	incorporado	19	19	39
NS-7	5,5	superficial	10	4	15
NS-7	6,5	superficial	13	13	26
NS-7	5,5	incorporado	6	4	10
NS-7	6,5	incorporado	16	18	33

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O.

4.6 Lixiviação de N Proveniente dos Fertilizantes Granulados

4.6.1 Solo de textura argilosa

No período experimental não ocorreram grandes perdas por lixiviação de N, resultante das misturas granuladas utilizadas. O N total lixiviado médio desses produtos corresponde a 2,1 mg de N, sendo originado, provavelmente, do N-fertilizante e do N-nativo. Esse baixo valor de N lixiviado nas misturas granuladas, provavelmente, deve-se as características do solo argiloso, principalmente o alto teor de argila (490 g kg^{-1} , Tabela 2), a capacidade de troca de cátion ($4,77\text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, Tabela 2). Solos com alta CTC apresentam grande capacidade de reter N-NH_4^+ e, como as misturas apresentam altos teores de biureto em suas composições, e o biureto retarda a nitrificação da uréia, esse retardo está relacionado com a maior quantidade de N-NH_4^+ no solo, o qual, provavelmente encontra-se ligado aos colóides do solo.

A quantidade de N lixiviado variou com o tipo de fertilizante nitrogenado, forma de incorporação e com o pH do solo. No solo com pH 6,5 independente da forma de incorporação, o total de N percolado após as quatro adições de água, foi significativamente maior que no solo com pH 5,5 para todos os fertilizantes, com exceção da UR em aplicação na superfície do solo, que não diferiu estatisticamente ($P < 0,05$). Quando os fertilizantes foram incorporados ao solo houve maiores perdas de N, na maioria dos fertilizantes nitrogenados (Tabela 12). As perdas iniciaram-se após a primeira percolação de água, momento no qual atingiram seu pico. No tratamento sem a aplicação de N, a percolação total foi de 6 mg de N. Isto, provavelmente, ocorreu pela contribuição do N proveniente da matéria orgânica do solo ($5,4\text{ g kg}^{-1}$, Tabela 1), que foi mineralizado pelos microrganismos do solo durante os primeiros 21 dias experimentais.

Na Tabela 11 estão apresentadas as quantidades de N lixiviados dos produtos NK e NS, aplicados em colunas de solo sob diferentes valores de pH do solo, e formas de incorporação. Verifica-se que em pH do solo 5,5 sem incorporação, que a UR apresentou as maiores perdas de N, sendo estas significativamente superiores ($P < 0,05$) às apresentadas pelos demais produtos, porém, as perdas apresentadas nos dois valores de pH não diferiram estatisticamente. Em solo com pH 6,5 o SA apresentou maior perda por lixiviação, seguida da UR. As misturas granuladas não apresentaram diferenças estatísticas, entretanto, em solo com pH 5,5, os produtos NK-7, NK-9 e NS-5 apresentaram perdas inferiores estatisticamente ($P < 0,05$), em relação às outras misturas granuladas.

Pode-se observar que, quando os produtos foram aplicados incorporados em solo com pH 6,5 houve aumento nas perdas em relação à aplicação em solo com pH 5,5. O SA aplicado ao solo com incorporação apresentou maior perda de N por lixiviação, seguidas da UR. As misturas granuladas NK e NS não apresentaram diferenças significativamente entre elas, nos dois valores de pH do solo.

Tabela 11. Nitrogênio mineral lixiviado do total aplicado (% N coluna⁻¹), dos fertilizantes NK e NS aplicados sob diferentes formas de aplicação e valores de pH no solo de textura argilosa.

produto	sem incorporação				com incorporação			
	pH 5,5		pH 6,5		pH 5,5		pH 6,5	
N (%) lixiviado.....							
NK-1	2,8	C b	3,4	C a	2,3	C b	2,6	C a
NK-3	1,0	D b	2,6	C a	1,8	C b	3,0	C a
NK-5	1,0	D b	2,2	C a	1,8	C b	3,0	C a
NK-7	0,5	E b	2,4	C a	0,8	C b	3,5	C a
NK-9	0,7	E b	2,9	C a	0,7	C b	2,5	C a
NK-11	1,4	D b	2,6	C a	1,0	C b	2,3	C a
NS-1	0,9	D b	2,6	C a	1,3	C b	2,9	C a
NS-3	0,8	D b	2,5	C a	1,1	C b	3,4	C a
NS-5	0,6	E b	2,7	C a	0,9	C b	2,1	C a
NS-7	1,0	D b	2,4	C a	1,7	C b	2,9	C a
UR	20,5	A a	20,1	B a	23,8	B b	42,3	B a
SA	18,4	B b	41,0	A a	27,3	A b	46,3	A a

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas colunas, não indicam diferenças entre os fertilizantes, enquanto diferentes letras minúsculas, para cada forma de incorporação entre as colunas, indicam diferenças entre o pH do solo à significância de 5% pelo teste Scott-Knott.

Tabela 12. Média do N-mineral lixiviado do total aplicado (mg coluna⁻¹), dos produtos NK e NS aplicados sobre solo textura argilosa com diferentes formas de aplicação, independente do pH do solo.

produto	sem incorporação		com incorporação		Média geral	
N (mg) lixiviado.....					
NK-1	2,96	C a	2,40	C b	2,68	C
NK-3	1,71	C b	2,26	C a	1,98	C
NK-5	1,55	C b	2,29	C a	1,92	C
NK-7	1,42	C b	2,06	C a	1,74	C
NK-9	1,71	C a	1,53	C a	1,62	C
NK-11	1,93	C a	1,58	C b	1,76	C
NS-1	1,66	C b	1,98	C a	1,82	C
NS-3	1,61	C b	2,16	C a	1,89	C
NS-5	1,55	C a	1,44	C a	1,49	C
NS-7	1,63	C b	2,19	C a	1,91	C
SA	28,53	A b	35,31	A a	31,92	A
UR	19,51	B b	31,70	B a	25,60	B
Média	5,48		7,24		6,36	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas colunas, não indicam diferenças entre os fertilizantes, enquanto diferentes letras minúsculas, entre colunas, indicam diferenças entre forma de incorporação à significância de 5% pelo teste Scott-Knott.

4.6.2 Teores de N mineral no solo ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ e N-NH_4^+)

Os teores residuais de N-mineral ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ e N-NH_4^+) no solo de textura arenosa, resultante da aplicação dos fertilizantes granulados NK e NS, sob duas formas de aplicação e dois valores de pH do solo, encontram-se na Tabela 13. Os resultados demonstraram que os fertilizantes granulados NK e NS, praticamente, não sofreram nitrificação, principalmente em pH 5,5, permanecendo o N-NH_4^+ como forma principal do N-mineral no solo.

Verifica-se na Tabela 13, que os fertilizantes granulados aplicados em solo com pH 6,5, apresentam teores residuais de N-NH_4^+ e N-NO_3^- maiores para todos os fertilizantes granulados NK e NS, em comparação ao pH do solo 5,5. O N-NH_4^+ ficou adsorvido pelas cargas negativas do solo em pH 6,5, acumulando altas concentrações no solo com pH 6,5.

O biureto, provavelmente, também inibiu a nitrificação do N aplicado ao solo, permanecendo altas quantidades de N-NH_4^+ no solo, o período experimental não foi suficiente para que a oxidação de N-NH_4^+ à N-NO_3^- ocorresse. Bhargava e Ghosh (1976) reportaram que o biureto retardou a nitrificação da uréia e que o grau de retardo, relaciona va-se, diretamente com a concentração de biureto na uréia. Sahrawat (1977) observou que o biureto não afeta diretamente a hidrólise da uréia, mas sim inibi, temporariamente, a conversão de N-NH_4^+ para N-NO_3^- e a subsequente oxidação de N-NO_2^- para N-NO_3^- .

Os teores no solo argiloso de N-NH_4^+ e $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$, em pH 5,5, foram muito baixos, indicando provavelmente, que a inibição da nitrificação seja mais intensa em solo com pH 5,5. Esses elementos ficaram possivelmente imobilizados pelos microrganismos do solo, não sendo disponibilizado pela extração do solo com KCl

Tabela 13. Teores residuais de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^- + N-NO_2^-$ do total aplicado ($mg\ coluna^{-1}$), dos produtos NK e NS aplicados sobre solo argiloso, com diferentes formas de aplicação e pH.

Fonte	pH	Forma incorporação	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N total
		mg N coluna ⁻¹		
NK-1	5,5	superficial	10	0	10
NK-1	6,5	superficial	15	0	15
NK-1	5,5	incorporado	1	0	1
NK-1	6,5	incorporado	31	3	35
NK-3	5,5	superficial	6	0	6
NK-3	6,5	superficial	33	8	42
NK-3	5,5	incorporado	1	0	1
NK-3	6,5	incorporado	68	5	73
NK-5	5,5	superficial	7	0	7
NK-5	6,5	superficial	88	11	98
NK-5	5,5	incorporado	0	0	0
NK-5	6,5	incorporado	58	7	66
NK-7	5,5	superficial	12	0	12
NK-7	6,5	superficial	33	6	39
NK-7	5,5	incorporado	0	0	0
NK-7	6,5	incorporado	60	3	63
NK-9	5,5	superficial	6	0	6
NK-9	6,5	superficial	95	6	101
NK-9	5,5	incorporado	10	0	10
NK-9	6,5	incorporado	23	5	28
NK-11	5,5	superficial	1	0	1
NK-11	6,5	superficial	13	0	13
NK-11	5,5	incorporado	4	0	4
NK-11	6,5	incorporado	35	8	43
NS-1	5,5	superficial	14	0	14
NS-1	6,5	superficial	92	9	101
NS-1	5,5	incorporado	8	0	8
NS-1	6,5	incorporado	66	5	71
NS-3	5,5	superficial	10	0	10
NS-3	6,5	superficial	79	9	88
NS-3	5,5	incorporado	11	0	11
NS-3	6,5	incorporado	65	11	76
NS-5	5,5	superficial	9	0	9
NS-5	6,5	superficial	26	1	26
NS-5	5,5	incorporado	9	0	9
NS-5	6,5	incorporado	16	1	18
NS-7	5,5	superficial	12	0	12
NS-7	6,5	superficial	85	4	89
NS-7	5,5	incorporado	8	0	8
NS-7	6,5	incorporado	28	7	34

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O.

4.7 Balanço Indireto das Perdas de N em Colunas de Solo

4.7.1 Solo de textura arenosa

O fertilizante granulado de maior eficiência em solo com pH 5,5 foi o NS-1, para a aplicação na superfície do solo, sendo o produto com menor perda de N. Entretanto quando os fertilizantes foram incorporados o mais eficiente foi o NS-3. O fertilizante de menor eficiência foi o UR, pois apresentou maiores perdas por lixiviação, em solo de textura arenosa, nas duas formas de incorporação.

Os produtos de maior eficiência aplicados em solo com pH 6,5 sem incorporação, foram o NK-1 > NS-1 > NS-5 > SA > NK-3, que apresentaram 49, 60, 60, 62, 66% de perdas do total aplicado. Quando os fertilizantes granulados foram aplicados incorporados, os mais eficientes foram o NK-3 > NK-1 > NS-3 > NS-1 > NK-7, com perda de 34, 39, 45, 53%, o NK-3, praticamente, não sofreu perda por volatilização de N-NH₃. O fertilizante UR foi o que apresentou maior perda de N do total aplicado (100%), nas duas formas de incorporação, isto é, todo N aplicado foi perdido por volatilização de N-NH₃ e por lixiviação do N-mineral, sendo que parte dessa perda pode ser oriunda da mineralização do N-orgânico do solo.

As perdas de N por volatilização e lixiviação foram maiores nos fertilizantes NK e NS com pH do solo a 6,5, sendo assim, os fertilizantes foram mais eficientes em pH 5,5 para maioria dos casos, como podemos observar na Tabela 14.

Tabela 14. Balanço indireto das perdas de N por volatilização e lixiviação, em colunas de solo arenoso, resultante da aplicação dos fertilizantes nitrogenados, em relação ao total aplicado.

Fonte	Aplicação	pH 5,5			pH 6,5		
		Volatilizado	Lixiviado	Total	Volatilizado	Lixiviado	Total
	% do N aplicado.....					
NK-1	s/in	26	19	46	28	22	49
	c/in	21	25	46	7	32	39
NK-3	s/in	34	18	52	43	24	66
	c/in	40	23	64	5	29	34
NK-5	s/in	39	21	61	44	29	73
	c/in	11	42	53	29	48	77
NK-7	s/in	43	18	61	44	28	71
	c/in	34	33	67	15	38	53
NK-9	s/in	38	28	66	43	32	75
	c/in	30	36	66	28	42	69
NK-11	s/in	37	29	66	45	37	82
	c/in	23	33	56	20	44	64
NS-1	s/in	22	13	35	26	34	60
	c/in	15	22	37	17	31	48
NS-3	s/in	26	20	47	39	30	69
	c/in	5	25	30	6	39	45
NS-5	s/in	29	21	51	32	27	60
	c/in	8	30	38	11	37	48
NS-7	s/in	43	19	62	44	33	77
	c/in	14	26	40	22	36	58
UR	s/in	18	55	73	20	80	100
	c/in	14	80	93	17	84	100
SA	s/in	1	63	64	0,5	61	62
	c/in	1	72	72	0,5	94	94

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%.

4.7.2 Solo de textura argilosa

Todos os fertilizantes granulados NK e NS apresentaram perdas de N por volatilização e lixiviação inferiores a 6% do total aplicado (Tabela 15). Essas perdas de N foram baixas, provavelmente, em decorrência da textura argilosa do solo e pelo fato desses fertilizantes apresentarem altos teores de biureto em suas composições, que estaria inibindo a nitrificação do N aplicado. Os produtos granulados NK e NS apresentaram alta eficiência do N, em solo argiloso.

A UR e o SA praticamente não sofreram volatilização de N-NH₃, assim como as misturas granuladas, devido, principalmente, a textura argilosa do solo, mas como a UR e o SA não apresentaram biureto em suas composições, portanto, a nitrificação não foi inibida, proporcionando altas perdas de N por lixiviação, principalmente, em solo com pH 6,5, onde a nitrificação foi mais intensa, resultando em eficiência do N reduzidas em comparação com as misturas granuladas.

Tabela 15. Balanço indireto das perdas de N por volatilização e lixiviação, em colunas de solo argiloso, resultante da aplicação dos fertilizantes nitrogenados, em relação ao total aplicado.

Fonte	Aplicação	pH 5,5			pH 6,5		
		Volatilizado	Lixiviado	total	Volatilizado	Lixiviado	total
.....% do N aplicado.....							
NK-1	s/in	1,83	2,8	4,64	1,85	3,4	5,20
	c/in	0,96	2,3	3,30	1,28	2,6	3,93
NK-3	s/in	1,86	1,0	2,86	1,93	2,6	4,48
	c/in	1,10	1,8	2,86	1,44	3,0	4,40
NK-5	s/in	1,48	1,0	2,47	1,59	2,2	3,83
	c/in	1,27	1,8	3,07	1,56	3,0	4,53
NK-7	s/in	1,34	0,5	1,85	1,88	2,4	4,32
	c/in	1,11	0,8	1,91	0,92	3,5	4,41
NK-9	s/in	1,78	0,7	2,48	1,90	2,9	4,76
	c/in	1,15	0,7	1,86	1,73	2,5	4,21
NK-11	s/in	1,67	1,4	3,10	2,81	2,6	5,41
	c/in	1,08	1,0	2,06	0,86	2,3	3,18
NS-1	s/in	1,30	0,9	2,18	1,92	2,6	4,50
	c/in	1,29	1,3	2,54	0,79	2,9	3,66
NS-3	s/in	1,27	0,8	2,09	3,16	2,5	5,70
	c/in	0,64	1,1	1,74	1,58	3,4	5,00
NS-5	s/in	1,30	0,6	1,86	2,00	2,7	4,66
	c/in	0,73	0,9	1,65	1,22	2,1	3,29
NS-7	s/in	2,19	1,0	3,17	2,20	2,4	4,62
	c/in	0,82	1,7	2,49	1,23	2,9	4,11
UR	s/in	1,28	20,5	21,82	2,37	20,1	22,47
	c/in	0,48	23,8	24,26	0,95	42,3	43,21
SA	s/in	1,11	18,4	19,54	1,65	41,0	42,66
	c/in	1,11	27,3	28,37	1,07	46,3	47,38

Conforme: NK-1: uréia pura 100%; NK-3: uréia 72,7% KCl 27,3%; NK-5: uréia 80,5% KCl 19,5%; NK-7: uréia 80% KCl 14% H₂O 6%; NK-9: uréia 57,2% KCl 42,8%; NK-11: uréia 47,1 KCl 52,9%; NS-1: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40%; NS-3: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20%; NS-5: uréia 60% (NH₄)₂SO₄ 40% + H₂O; NS-7: uréia 80% (NH₄)₂SO₄ 20% + H₂O; UR: uréia comercial 100%; SA: (NH₄)₂SO₄ 100%.

5 CONCLUSÕES

Os fertilizantes granulados NK e NS, não reduziram as perdas por volatilização, nos solos de textura arenosa e argilosa, nas condições estudadas.

As perdas por volatilização de $N-NH_3$ foram minimizadas quando os fertilizantes foram aplicados incorporado ao solo e com pH a 6,5, para as duas classes de solo.

Para os solos de textura arenosa e argilosa, a lixiviação foi reduzida quando os fertilizantes foram aplicados na superfície do solo e com pH 5,5.

O pH do solo a 6,5, intensificou a taxa de nitrificação e o movimento subsequente de $N-NO_3^-$ via percolação, nas duas classes de solo.

O biureto inibiu a nitrificação do N-fertilizante, principalmente no solo de textura argilosa.

A textura do solo influenciou as perdas de nitrogênio por volatilização e lixiviação, sendo que o solo de textura argilosa apresentou menores perdas de N que o de textura arenosa.

Os teores de N-mineral residual, proveniente das fontes de N-fertilizantes, foram maiores no solo com pH 6,5.

As perdas de N foram maiores no solo de textura arenosa, sendo que os produtos NK-1, NK-3 e NS-1 foram mais eficientes nas reduções das perdas de N, nas condições estudadas.

Todos os fertilizantes granulados NK e NS apresentaram perdas de N por volatilização e lixiviação inferiores a 6% do total aplicado, no solo de textura argilosa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A. C. Métodos para quantificar a volatilização de N-NH₃ em solo fertilizado com uréia. Pirassununga. 2006. 41f. Dissertação (Mestrado em Qualidade e Produtividade Animal). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 2006.
- ALVES, B. J. R. Métodos de determinação do nitrogênio em solo e planta. In: ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. (Ed.). Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, p. 449-469, 1994.
- ANJOS, J. T.; TEDESCO, M. J. Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados aplicados em solos cultivados. Científica, v. 4, p. 49-55, 1976.
- ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Anuário Estatístico Setor de Fertilizantes. 2008. Disponível em: www.anda.org.br. Acesso em: 15 de fev. 2008.
- ARAÚJO, E. S. Validação do modelo Nutmon para o diagnóstico do manejo agrícola: Estudo em duas propriedades familiares do Rio de Janeiro. 2008. 99f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do solo). Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.
- ARAÚJO, E. S.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R. Câmara coletora para quantificação do N-NH₃ volatilizado do solo. Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2006. 4p.(Comunicado Técnico Embrapa no 87).
- ARAÚJO, C.; RUIZ,.; SILVA, D.; FERREIRA, P.; ALVAREZ, V.; BAHIA, A. Eluição de fósforo em relação ao tempo de difusão em colunas com agregados de um latossolo vermelho distrófico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.7, n.1, p.24-30, 2003.
- AZEVEDO, A. S.; KANWAR, R. S.; SINGH, P.; PEREIRA, L. S. Movement of NO₃ and antrazine through soil columns as affected by lime application. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.39, n.3, p.937-945, 1995.
- BHARGAVA, B. S.; GHOSH, A. B.; Short note on effect of biuret content in urea on its nitrification in soil, Indian Agricultural Research Institute, Div. of Soil Science and Agricultural Chemistry, New Delhi, v. 21, n.1, p.76-77, 1976.
- BINKLEY, D.; HEATHER, B; ALLEN, H. L. Water quality impacts of forest fertilization with nitrogen and phosphorus. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v.121, p.191-213, 1999.
- BOLOGNA, I. R.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; FAONI, C. E.; FRANCO, H. C. J. Lixiviação de enxofre em solo arenoso cultivado com cana-de-açúcar. In: Reunião Brasileira de Manejo da Água e do Solo, 16., 2006, Aracajú. Resumo. Aracajú: UFS, SBCS, p.45-46, 2006.
- BARBIERI, P. A.; ECHEVERRÍA, H. E. Evolucion de las perdidas de amoníaco desde urea aplicada en otoño y primavera a una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*). INTA, Argentina, v. 32, n.1, p.17-29, 2003.
- BORTOLINI, C. G. Eficiência do método de adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho implantado em semeadura direta após aveia preta. 48p. 2000. Dissertação (Mestre em Agronomia.). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

- BOUWEESTER, R. J. B.; VLEK, P. L. G.; STUMPE, J. M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 49, n. 2, p. 376-381, 1985.
- BYRNES, B. H. Liquid fertilizers and nitrogen solutions. In: International Fertilizer Development Center, *Fertilizer Manual*. Alabama: Kluwer Academic, n. 2, p. 20-44, 2000.
- BREMNER, J. M. Nitrogen availability indexes. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, p.1324-1354. part 2. (Agronomy Monography, 9), 1965.
- BREMNER, J. M.; MULVANEY, R. L. Urease activity in soils. In: BURNS, R. G. (Ed.). *Soils enzymes*. London, Academic Press, p. 149-196, 1978.
- CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Comparative study of life hydrolytic methods in the determination of soil organic nitrogen compounds. *Communications in Soil Science Plant Analysis*, Montcello, v. 28, p. 1303-1309, 1997.
- CAMARGO, P. B. Dinâmica do nitrogênio dos fertilizantes: uréia (^{15}N) e amônia (^{15}N) incorporados ao solo na cultura de cana-de-açúcar. 104p. 1989. Dissertação (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Planta) Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1989.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do solo*, Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 375-470, 2007.
- CANTARELLA, H.; MATOS, D. J.; QUAGGIO, J. A.; RIGOLIN, A. T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilizer with different N sources and the loss of applied N. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 67, p. 215-223, 2003.
- CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R.; BARBOSA, W.; PENNA, M. J.; RESENDE, L. C. L. Perdas de N por volatilização da amônia e resposta da cana-de-açúcar a adubação nitrogenada em sistema de colheita de cana sem queima previa. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, n. 7. Londrina, 1999.
- CERETTA, C. A. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-milho, no sistema de plantio direto. *Revista de Santa Maria*, n. 5, p.112-124, 1997.
- COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH_3 de fontes nitrogenadas em cana de açúcar colhida sem despalha a fogo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, n. 27, p. 631-637, 2003.
- CORSI, M. Uréia como fertilizante na produção de forrageira. In: Simpósio sobre nutrição de bovinos, Piracicaba. FEALQ, Anais, p. 275-308, 1984.
- CLÓVIS, O. D. R.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Ammonia volatilization after urea surface applied in corn no tillage. *Ciência Rural*, Santa Maria, n. 35, p.799-805, 2005.
- CURTIN, D.; SMILLIE, G. W. Soil solution composition as affected by liming and incubation. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 47, n. 4, p. 701-707, 1983.
- 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, p. 799-805, 2005.
- DIEST, V. A. Volatilización del amoníaco en los suelos anegados, y sus repercusiones en el rendimiento de arroz. *Noticiarios de la Comisión Internacional del arroz*, FAO, n.37, p. 1-6, 1988.

DUARTE, F. M. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e eficiência da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado. 2006. 63f. Dissertação (Tese de Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

Du PLESSIS, M. C. F.; MATOCHA, J. E. The relationship between pH and ammonia equilibria in soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 45, p.751-754, 1964.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. Ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. (EMBRAPA CNPS. Documento, 1).

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Mineral nutrition of plants: principles and perspective. 400p. ed. Sunderland, Sinauer associates, 2005.

ERNANI, P. R. Nutrição e produtividade de espécies vegetais em sistema de plantio direto e convencional. In: Reunião Técnica Catarinense: Milho & Feijão, Lages, 2., 1999. Resumos. Lages: UDESC/ EPAGRI, v.1, p.19-30, 1999.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.58, n.4, p.825-831, out./dez. 2001.

ERNST, J. W.; MASSEY, H. F. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.24, p.87-90, 1960.

ESPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; IGUE, T.; NELLI, E. J. Aplicação de aquamônia, uréia, nitrato de potássio e cloreto de potássio em cinco níveis, em três socas de cana-de-açúcar. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, n. 4, Olinda. p.94-102, 1987.

FENN, L. B.; ESCARZAGA, R. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils: V. Soil Water Content and Method of Nitrogen Application, *Soil Science Society of America*, Am J n. 40, p. 537-541, 1976.

FENN, L. B.; RICHARDS, J. Ammonia loss from surface applied ure-acid products. *Fert. Res.*, The Hague, n.9, p.265-275, 1986.

FENN, L. B.; KISSEL. D. E. The influence of cation exchange capacity and depth of incorporation on ammonia volatilization from ammonium compounds applied to calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J. Madison*, v.40, p.394-398, 1976.

FENN, L. B.; MATOCHA, J. E.; WU, E. Substitution of ammonium and potassium for added calcium in reduction of ammonia loss from surface-applied urea. *Soil Sci. Soc. Am. J.; Madison*, v.46, p.771-776, 1982.

FENN, L. B.; MATOCHA, J. E.; WU, E. Ammonia losses from surface-applied urea and ammonium fertilizers as influenced by rate of soluble calcium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 45, p. 883-886, 1981.

FRANCO, J. A. M.; SARAIVA NETO, A. Produção de fertilizante nitrogenado e suprimento de matéria prima. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. Ed. IPNI, Piracicaba, 2007.

FRENEY, J. R. Estimating ammonia volatilization from flooded rice fields by simplified methods. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.49, n.4, p.1049-1054, 1985.

FRIES, M. R. Microbiologia e material orgânica: recuperação pelo sistema de plantio direto. In: FRIES, M. R.; DALMOLIN, R. S. D. Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto. *Revista Santa Maria*, v.3, p. 47-75, 1997.

GAMEH, M. A.; ANGLE, J. S. Effects of urea-potassium chloride and nitrogen transformations on ammonia volatilization from urea. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, n. 54, p. 1768-1772, 1990.

GUEDES, C. A. B. Volatilização de N e alterações químicas do solo sob cultivo de cana-de-açúcar com aplicação de vinhaça e diferentes formas de colheita. 2002. 77p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do solo). Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2002.

HARGROVE, W. I. Soil environmental and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions, In: BOCK, B. R.; KISSEL, D. E. (Ed.) Ammonia volatilization from urea fertilizers. Alabama: NFDC, TVA, n. 2, p. 17-36, 1988.

HU, X. F.; SUN, Q. Q.; WANG, Z.Y. Study on ammonia volatilization of slow/controlled release compound fertilizer. Nitrogen 4th conference, Costa do Sauípe, Bahia, Brasil, p. 114, 2007.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; CRISPINO, C. C.; MORAES, J. Z.; SILBALDELLI, R. N. R.; MENDES, I. C. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and of N fertilizer to grain yield. *Can. J. Plant Sci.*, v. 86, p. 927-939, 2006.

JAYAWEERA, G. R.; MIKKELSEN, D.S. Assessment of ammonia volatilizations from flooded soil systems. *Advances in Agronomy*, v.45, p.303-356, 1991.

KIEHL, J. C. Distribuição e retenção de amônia no solo após aplicação de uréia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 13, p. 75-80, 1989.

KISSEL, D. E.; CABRERA, M. L.; FERGUSON, R. B. Reactions of ammonia and urea hydrolysis products with soil. *Soil Sci. Society of Am J.*, Madison, n. 98, p. 1793-1796, 1988.

KISSEL, D. E.; BREWER, H. L.; ARKIN, G. F. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization. *Soil Sci. Society of Am J.*, Madison, n. 41, p. 1133-1138, 1977.

KONG, W. P.; WOOD, A. W.; PRAMMANEE, P.; SAFFIGNA, P. G. Ammonia loss of urea/potassium chloride mixtures applied to sugarcane trash. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, n.13, p.58-65, 1991.

KRESGE, C. B.; SATCHELL, D. P.; Gaseous Loss of Ammonia from Nitrogen Fertilizers Applied to Soils, *American Society of Agronomy*, Madison, v.52, p.104-107, 1960.

KURZER, F. Biuret and related compounds. *Chemical Reviews*, n. 56, p. 95-197, 1956.

LOW, A. J.; PIPER, F. J. The ammonification and nitrification in soil of urea with and without biuret. *Journal of Agricultural Science*, v. 75, p. 301-309, 1970.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 21, p. 489-496, 1997.

LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O.; BOARETTO, A. E. Efeito do tamanho do grânulo e relação N/S da uréia aplicada em superfície na volatilização de amônia sob diferentes umidades iniciais do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, n. 16, p. 409-413, 1992.

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

- LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O.; BENDASSOLLI, J. A.; GASCHO, G. J. Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, n. 30, p. 389-406, 1999.
- LINN, D. M.; DORAM, J. W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and no tilled soils. *Soil Sci. Society of Am. J.*, Madison, v.48, p.1267-1272, 1984.
- LIBARDI, P. L. Balanço de nitrogênio em cultura agrícolas e desvios encontrados na sua quantificação. 113p. 1984. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- LUIS, S.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C.; Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de avia em dois solos com texturas contrastantes, *Ciência Rural*, Santa Maria, v.33, n.1, 2003.
- MAGDOFF, F. Understanding the Magdoff pre-sidedress nitrate test for corn. *Journal of Production Agriculture*, Madison, v. 3, n. 4, p. 297-305, 1991.
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição de plantas, São Paulo: Editora Agronômica Ceres. 126p. 2006.
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Instrução Normativa nº 05, de 23 de fevereiro de 2007. Disponível em: <http://www.cfm.org.br/portal/legislacao.php>. Acesso: 20 de outubro de 2008.
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Instrução Normativa Sda nº 27, 05 de Junho de 2006. Publicada no D.O.U do dia 09/06/2007, nº 110, seção 1, pagina 15 e 16. Disponível em: <http://www.cfm.org.br/portal/legislacao/aceso/portal.php> Acesso: 20 de outubro de 2008.
- MARTIN, J. P.; CHAPMAN, H. D. Volatilization of ammonia from surface-fertilized soils. *Soil Sci.*, v. 71, p. 25-34, 1951.
- MARTHA JÚNIOR, G. B. Produção de forragem e transformação do nitrogênio do fertilizante em pastagem irrigada de capim Tanzânia. 104p. 2003. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Planta) Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2003.
- MARSOLA, T.; TAKAHASHI, H. W.; MIYAZAWA, M. Calibração de um sistema coletor de amônia volatilizada do solo e aplicada em campo. In: IV Mostra Acadêmica de Trabalhos de Agronomia, Londrina, Editora UEL, v. 4, p. 123-123, 2000.
- McINNES, K. J.; FILLERY, I. R. P. Modeling and field measurements of the effect of nitrogen source on nitrification. *Soil Sci. Society of America. J.*, v. 53, p. 1264-1269, 1989.
- McGARITY, J. W.; RAJARATNAM, J. A. Apparatus for the measurement of losses of nitrogen as gas from the field and simulated environments. *Soil Biol. Biochem.*, Oxford, v. 5, p. 121-131, 1973.
- MELGAR, R.; CAMOZZI, M. E.; FIGUEROA, M. M. Guia de fertilizantes nitrogenados, enmiendas y productos nutricionales. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnologia. Agropecuária, v. 1, p. 13-25, 1999.
- MELO, W. J. Matéria orgânica, nitrogênio e enxofre. Curso de atualização em fertilidade do solo. Jaboticabal: ANDA, 66p. 1978.
- MIKKELSEN, R. L. Biuret in urea fertilizers. *Better Crops with Plant Food*, IPNI, v.151, n. 3, p. 3-91, 2007.

- MIKKELSEN, R. L. Biuret in urea fertiliser. *Fertiliser Research*, n.26, p.311–318, 1990.
- MIKKELSEN, D. S. Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. *Plant and Soil*. v. 100, n. 3, p. 71-97, 1987.
- MIKKELSEN, D. S., DE DATTA, S. K., OBCEMEA, W. N. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 42, n. 5, p. 725-730, 1978.
- MITHYANTHA, M. S.; KULAKARNI, D. S.; TRIPATHI, S. C.; AGNIHOTHURUDU, V. Biuret and crop production. *Fertilizer News*, v. 20, p. 13-18, 1977.
- MOAL, J. F. Ammonia volatilization following surface applied pig and cattle slurry in France. *Journal of Agricultural Science*, v. 25, p. 245-252, 1995.
- MORTLAND, M. M. Reactions of ammonia in soils. *Adv. Agron.*, New York. v.10, p.325-348, 1958.
- MORRIL, L. G.; DAWSON, J. E. Patterns observed for the oxidation of ammonium to nitrate by soil organisms. *Soil Sci. Society American Proc.*, n. 31, p.757-760, 1967.
- MUZILLI, O. A influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.7, n.1, p.95-102, 1983.
- NELSON, D. W. Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification. In: STEVENSON, F. J. *Nitrogen in agricultural soils*. ASA, Madison, p. 327-363, 1982.
- NG KEE KWONG, K. E.; DEVILLE, J. Nitrogen leaching from soils cropped with sugarcane under the humid tropical climate of Mauritius, Indian Ocean. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.13, n.3, p.471-474, 1984.
- NÖNMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soils. *Plant Soil*, v. 39, p. 309-318, 1973.
- OENEMA, O.; VELTHOF, G. L. Ammonia volatilization from compound nitrogen-sulfur fertilizer. In: FRAGOSO, M. A. C. & van BEUSICHEM, M. L. (Ed). *Optimization of plant nutrition*. Amsterdam, Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 341-349.
- OVERREIN, L. N.; MOE, P. G. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 22, p. 57-61, 1967.
- PLESSIS, M. C. F.; KROONTJE, W.; The Relationship between pH and Ammonia Equilibria in Soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.28, p.751-754, 1964.
- PORT, O.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Perda de nitrogênio por volatilização de amônia com o uso de dejetos de suínos em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, p. 857-865, 2003.
- RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: CERES-POTAFOS, 1991. 343p.
- RAJARATNAM, J. A.; PURUSHOTHAMAN, A. Studies of nitrogen losses from soils in Malasia. Influence of soil Moisture, rates and types of nitrogenous compound on ammonia and isotopic dilution methods. *Fertilizer Research*, v.33, p.209-217, 1992.
- RAPPAPORT, B. D.; AXLEY, J. H. Potassium chloride for improved urea fertilizer efficiency. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 78, p. 399-401, 1984.
- REYNOLDS, C. M., WOLF, D. C. Effects of soil moisture and air relative humidity on ammonia volatilization from surfaces-applied urea. *Soil Science*, v. 143, n. 2, p. 144-152, 1987.

- REICHARDT, K.; LIBARDI, P. L.; URQUIAGA, S. C. The fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics. In. International Symposium Agrochemical: Fate in Food and the Environmental Using Isotope Techniques, 1982, Rome. Proceedings... Vienna: IAEA, p.277-289, 1982.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri, Manole, 2004. 359p.
- RODRIGUES, M. B.; KIEHL, J. C. Distribuição e nitrificação da amônia proveniente da uréia aplicada ao solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa. v.16, p.403-408, 1992.
- RODRIGUES, M. B.; KIEHL, J. C. Volatilização de amônio após emprego de uréia em diferentes doses e modos de aplicação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 10, p. 37-43, 1986.
- TRIVELIN, P. C. O. Técnicas com o traçador N¹⁵ em estudos de perdas gasosas de nitrogênio do solo. Apostila do programa de pós graduação em energia nuclear na agricultura, CENA/USP. Piracicaba, 2001.
- SADEGHI, A. M.; KISSEL, D. E.; CABRERA, M. L. Estimating molecular diffusion coefficients of urea in unsaturated soil. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v. 53, p. 15-18, 1989.
- SAHRAWAT, K. L. Mineralization of biuret nitrogen soil. Plant and Soil, v. 62, p. 469-471, 1981.
- SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; RAMPAZZO, C.; LECH, V. A. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. Revista Ciência Rural, v. 33, p. 65-70, 2002.
- SAVANT, N. K.; JAMES, A. F.; McCLEAN, G. H. Effect of amounts and sequence of additions of urea and water on hydrolysis of surface-applied granular urea in unsaturated soils. Fertil. Res., v. 11, p. 231-234, 1987.
- SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. Mineralização e absorção por milho do nitrogênio do solo, da palha de milho-(¹⁵N) e da uréia-(¹⁵N). Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.17, n.3, p.423-429, 1993.
- SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH V. A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. Ciência Rural, Santa Maria, v.33, n.1, p.65-70, 2003.
- SENGIK, E.; KIEHL, J. C. Controle da volatilização de amônia em terra tratada com uréia e turfa pelo emprego de sais orgânicos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 19, p. 455-461, 1995.
- SAHRAWAT, K. L. Effect of biuret content on transformation of urea nitrogen in soil. Soil Biology and Biochemistry, v. 9, n.3, p.173-175, 1977.
- SILVA, A. J. Perdas de amônia por volatilização proveniente da uréia aplicada a solos dos trópicos úmidos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.19, p.141-144, 1995.
- SILVA, F. C., ed. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 370p. 1999.
- SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um latossolo vermelho distrófico de cerrado sob diferentes usos de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27, p. 133-139, 1995.
- SOMMER, S. G.; OLSEN, J. E. Effects of dry matter content and temperature on ammonia loss from surface applied cattle slurry. Journal of Environmental Quality, v. 20, p. 679- 683, 1991.

- TEDESCO, M. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p.
- THORBURN, J. P.; MEIER, E. A.; PROBERT, M. E. Modeling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. *Field Crop Research*, Amsterdam, v.92, n.2/3, p.337-351, 2005.
- TILMAN, D. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. In: *Plants and population: Is there time?* National Academy of Science, Irvine, v. 96, p. 5995-6000, 1999.
- TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. *Soil Fertility and Fertilizers*. New York: MCMILLAN, 5. 1993.
- TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, N. W.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, p. 193-201, 2002.
- TRIVELIN, P. C. O. Técnicas com o traçador N¹⁵ em estudos de perdas gasosas de nitrogênio do solo. 104p. Apostila do programa de pós-graduação em energia nuclear na agricultura, CENA-USP, Piracicaba, 2001.
- TOMÉ Jr, J. B. *Manual para Interpretação de Análise de Solo*. Guaíba: Agropecuária, 247 p., 1997.
- URQUIAGA, S.; VICTÓRIA, R. L.; BUITRÓN, F.; NEYRA, J. C. Perdas por volatilização do ¹⁵N-uréia e ¹⁵N-sulfato de amônio num solo calcário da parte central da região costeira do Peru. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 24, n. 5, p. 607-613, maio 1989.
- URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Dinâmica de N no solo. In: *I Simpósio Brasileiro sobre Nitrogênio em Plantas*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, RJ. p.127-149. 1993.
- VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P. Produtividade de cana de açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados sobre a palha. *Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil*, v. 23, p. 30-35, 2005.
- VILLAS BOAS, R. L.; BOARETO, A. E.; GODOY, L. J. G.; FERNANDES, D. M. Recuperação do nitrogênio da mistura de uréia e sulfato de amônio por plantas de milho. *Bragantia*, v. 64, p. 263-273, 2005.
- VILLAS BOAS, R. L. Recuperação do nitrogênio da uréia pelo milho: efeito da mistura com sulfato de amônio, da dose e do modo de aplicação. 128p. 1995. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Planta) Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1995.
- VLEK, P. L. G., STUMPE, J. M. Effects of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilization losses from aqueous systems. *Science Society American Journal*, Madison, v. 42, p. 416-421, 1978.
- VLEK, P. L. G., CRASWELL, E. T. Ammonia volatilizations from flooded soils. *Fertilizer Research*, v. 2, p. 227-245, 1981.
- VOLK, G. M. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 51, p. 746-749, 1959.
- VOLK, G. M. Efficiency of fertilizer urea as affected by method of application. In: *VOLK, G. M. Soil Moisture, and Lime*. American Society of Agronomy, Madison, v.58, p.249-252, 1966.

- WATSON, C. J. An assessment of granular urea/ammonium nitrate fertilizers on nitrogen recover by ryegrass. *Fertilizer Research*, v. 18, p. 19-29, 1988.
- WANG, F. L.; ALVA, A. K. Ammonium adsorption and desorption in sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J*, Madison, v. 64, p.1669-1674, 2000.
- WERNECK, C. G. Perdas por volatilização e eficiência no aproveitamento do nitrogênio proveniente de uréia adicionada de zeolitas naturais na cultura da roseira (*rosa spp.*). 2008 73f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.
- WHITE, R. E. Leaching. In: WILSON, J. R. (Ed.). *Advance in nitrogen cycling in agricultural ecosystems*. CAB International, Wallingford, UK. v. 1, p. 193-211, 1987.
- WANG, F. L.; ALVA, A. K. Leaching of nitrogen from slow-release urea sources in sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1454-1458, 1996.
- XUE, J. M.; SANDS, R.; CLINTON, P. W.; PAYN, T.; SKINNER, M. F. Carbon and net nitrogen mineralization in two forest soils amended with different concentrations of biureto. *Soil Biology & Biochemistry*, v.35, p.855–866, 2003.