



ANDRÉ LEITE SILVA

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DA UREIA
ESTABILIZADA COM INIBIDORES DE
UREASE E NITRIFICAÇÃO NA CULTURA DO
MILHO**

Lavras – MG

2016

ANDRÉ LEITE SILVA

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DA UREIA ESTABILIZADA COM
INIBIDORES DE UREASE E NITRIFICAÇÃO NA CULTURA DO
MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de plantas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Coorientador

Dr. Valdemar Faquin

LAVRAS – MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo próprio autor.**

Silva, André Leite.

Eficiência agronômica da ureia estabilizada com inibidores de urease e nitrificação na cultura do milho / André Leite Silva. –
Lavras: UFLA, 2016.

71 p.: il.

Dissertação (mestrado acadêmico) –Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador: Douglas Ramos Guelfi Silva.

Bibliografia.

1. Fertilizantes nitrogenados. 2. Volatilização de amônia. 3.
Tecnologia de fertilizantes. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

ANDRÉ LEITE SILVA

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DA UREIA ESTABILIZADA COM
INIBIDORES DE UREASE E NITRIFICAÇÃO NA CULTURA DO
MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de plantas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de abril de 2016.

Dr. Cícero Célio de Figueiredo UnB

Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva UFLA

Dr. Marco Aurelio Carbone Carneiro UFLA

Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Orientador

LAVRAS – MG

2016

*A todos que lutam por uma sociedade mais justa, sem fome e sem
corrupção.*

A todos que acreditam no poder transformador da educação.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS) pela oportunidade de realização do Mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte financeiro.

Aos excelentes professores do DCS que contribuíram para minha formação pessoal e profissional, em especial ao meu orientador Prof. Douglas Guelfi, pelo companheirismo e dedicação.

Aos funcionários do DCS, em especial às secretárias Dirce e Maria Alice e ao laboratorista Roberto, pela dedicação e suporte necessários.

Aos amigos do DCS por tornarem a caminhada mais agradável e divertida com suas presenças.

A todos que contribuíram na execução deste experimento, bolsistas de iniciação científica e estagiários, em especial ao amigo Taylor Lima, que me auxiliou durante todo o experimento.

Ao amigo Rodolfo e à amiga Ivy, pela amizade incondicional.

À minha noiva Taiana pelo amor e companheirismo, e toda sua família, pelo carinho e zelo.

À minha família, meus pais Alexandre e Silvana e meus oito irmãos, que são meu alicerce, fonte de inspiração e amor.

RESUMO

O nitrogênio (N) é o nutriente de maior demanda por plantas milho e para suprir essa exigência nas lavouras de alta produtividade são utilizados fertilizantes minerais, em especial a ureia. O inconveniente da ureia é a perda de N-NH_3 para a atmosfera. Para reverter essa situação algumas tecnologias têm sido desenvolvidas, como os inibidores da urease e de nitrificação, que são utilizados como aditivos na ureia. Objetivou-se com trabalho avaliar a eficiência agronômica da ureia estabilizada com inibidores de urease e nitrificação aplicados em cobertura na safra de milho 2013/2014. Foram avaliados 11 fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura: ureia + PA (41,6% N; 3% Cu); ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu); ureia + PA (41,6% N; 3% Zn); ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn); ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B); ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B); ureia + PA (41,6% N); ureia (44,3% N; 0,15% Cu; 0,4% B); ureia (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo); ureia perolada (46% N); ureia + 0,8% DMPP (45% N) e o tratamento controle, que não recebeu adubação nitrogenada em cobertura. As avaliações realizadas foram: perdas de N por volatilização de amônia, teor e acúmulo de N, boro (B), cobre (Cu) e zinco (Zn) no florescimento, na massa seca da parte aérea e nos grãos e produtividade (palhada e grãos). Os fertilizantes estabilizados com inibidores da urease e de nitrificação não reduziram as perdas de amônia por volatilização em comparação à ureia perolada. A ureia com 0,8% do inibidor de nitrificação DMPP (3,4-dimetilpirazolfosfato) promoveu maior perda de N por volatilização, menor produtividade e eficiência agronômica em comparação à ureia perolada. O revestimento da ureia com Cu, B e Zn não aumentou o acúmulo desses nutrientes nos grãos e na MSPA das plantas. O uso dos fertilizantes estabilizados e revestidos com micronutrientes não promoveu aumento na produtividade e eficiência agronômica em comparação à ureia convencional.

Palavras-chave: Fertilizantes nitrogenados. Volatilização de amônia. Tecnologia de fertilizantes.

ABSTRACT

Nitrogen (N) is the most required nutrient for corn plants and, in order to supply this demand in highly productive crops, mineral fertilizers are used, especially urea. The disadvantage of urea is the loss of N-NH₃ to atmosphere. To reverse this situation, some technologies have been developed, such as nitrification and urease inhibitors, which are used as additives to urea. This work aimed at evaluating the agronomic efficiency of urea stabilized with urease and nitrification inhibitors applied to cover the 2013/2014 corn crop. We evaluated 11 nitrogen fertilizer applied in coverage: urea + PA (41.6% N, 3% Cu); urea + PA (41.6% N, 1.5% Cu); urea + PA (41.6% N, 3% Zn); urea + PA (41.6% N, 1.5% Zn); urea + PA (41.6% N, 0.34% Cu, 0.94% B); urea + PA (41.6% N, 0.25% Cu, 0.68% B); urea + PA (41.6% N); urea (44.3% N, 0.15% Cu, 0.4% B); urea (43% N, 0.1% Cu, 0.3% B, 0.05% Mo); pearled urea (46% N); urea + 0,8% DMPP (45% N) and the control, which did not receive nitrogen topdressing. The evaluations were: Nitrogen losses through volatilization, content and accumulation of N, boron (B), copper (Cu) and zinc (Zn) to the dry matter of aerial parts, grains, and in straw and grain productivity. Fertilizers stabilized with urease and nitrification inhibitors did not reduce the volatilization of ammonia volatilization, when compared to pearled urea. Urea with 0.8% of DMPP nitrification inhibitor (3,4-dimethylpyrazole phosphate) provided higher loss by volatilization, lower productivity and agronomic efficiency compared to pearled urea. The coating of urea with Cu, B and Zn did not increase the accumulation of these nutrients in grains and MSPA plants. The use of fertilizers stabilized and coated with micronutrients did not increase the productivity and agronomic efficiency compared to conventional urea.

Keywords: Nitrogen fertilizers. Ammonia volatilization. Fertilizer technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Bases de PVC para coleta de amônia.....	33
Figura 2 Câmara coletora de amônia, tipo semiaberta.....	33

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 Condições climáticas durante o desenvolvimento do experimento: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e umidade relativa do ar. Fonte: estação climatológica principal de Lavras, 5° Distrito de Meteorologia.....28
- Gráfico 2 Condições climáticas durante as análises de volatilização: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e umidade relativa do ar. Fonte: estação climatológica principal de Lavras, 5° Distrito de Meteorologia (a). Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH₃) 27 dias após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Barras verticais indicam o erro padrão da média pelo teste Scott-Knott a 5% de significância (b).....39
- Gráfico 3 Perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH₃) 27 dias após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Barras verticais indicam o erro padrão da média pelo teste Scott-Knott a 5% de significância.....42
- Gráfico 4 Teores foliares de nitrogênio (N) no florescimento após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014.....46
- Gráfico 5 Produtividade de grãos de milho (t ha⁻¹) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014.....48

Gráfico 6 Nitrogênio acumulado (kg ha^{-1}) na massa seca da parte aérea (MSPA), grãos e total após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014.....	51
Gráfico 7 Acúmulo de boro (g ha^{-1}) no grão, massa seca da parte aérea (MSPA) e total (soma da MSPA e grão) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014.....	53
Gráfico 8 Acúmulo de cobre (g ha^{-1}) na massa seca da parte aérea (MSPA), grão e total (soma da MSPA e grão) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014.....	55
Gráfico 9 Acúmulo de zinco (g ha^{-1}) na massa seca da parte aérea (MSPA), grão e total (soma da MSPA e grão) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014.....	57
Gráfico 10 Eficiência agronômica (EA) do milho (kg grãos kg^{-1} de N aplicado) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014.....	59
Gráfico 11 Eficiência agronômica relativa (EAR) (%) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Atributos químicos (camadas de profundidade 0-5 cm, 0-20 cm e 20-40 cm) e textura (camadas de profundidade 0-5 cm, 0-20 cm e 20-40 cm) do Latossolo Vermelho Amarelo. Lavras, MG, 2014.....	29
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Cultura do milho.....	16
2.2	Nitrogênio.....	18
2.3	Volatilização de nitrogênio.....	20
2.4	Fertilizantes estabilizados e de liberação lenta e controlada	24
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1	Caracterização da área experimental.....	27
3.2	Delineamento Experimental.....	30
3.3	Caracterização dos fertilizantes e tratamentos.....	30
3.4	Semeadura e Tratos Culturais.....	31
3.5	Avaliações.....	32
3.5.1	Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia.....	32
3.5.2	Análise foliar.....	34
3.5.3	Produtividade de palhada e grãos, teor e acúmulo de nutrientes na palhada e no grão.....	35
3.5.4	Índices de eficiência.....	36
3.6	Análises estatísticas.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1	Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia.....	37
4.2	Teor foliar de nutrientes no florescimento.....	44
4.3	Produtividade de palhada e grãos.....	47
4.4	Teor e acúmulo de nutrientes na palhada e nos grãos.....	50
4.5	Índices de eficiência.....	58
5	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

O atual cenário agrícola brasileiro exige aplicação de altas doses de fertilizantes, especialmente o nitrogênio (N), que é o nutriente exigido em maiores quantidades pela maioria das culturas agrícolas. O uso excessivo ou incorreto de alguns fertilizantes pode causar problemas ambientais, tais como eutrofização de rios e lagos, contaminação de lençol freático, liberação de gases indesejáveis ao ambiente, como os gases do efeito estufa (GEE): dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), entre outros.

O milho é uma cultura plantada em grande parte do Brasil, representando aproximadamente 27% de toda área plantada no ano de 2015 (CONAB, 2015), e com destaque para a região do cerrado, onde tem se difundido rapidamente nos últimos anos.

Junto a essa expansão no cultivo da cultura do milho surgem as preocupações ambientais, e o N por ser um nutriente muito dinâmico no solo e susceptível a perdas por lixiviação (nutriente é levado para fora do alcance das raízes) e volatilização (nutriente é perdido para a atmosfera na forma de gás), é um nutriente que ainda demanda bastante estudo, especialmente no âmbito dos fertilizantes nitrogenados.

Com o crescimento acelerado da população mundial torna-se necessário um aumento na produção de alimentos. O sistema de agricultura praticado atualmente, onde se objetiva altas produtividades, depende largamente do uso de fertilizantes minerais. Com o aumento da produtividade tem-se maior demanda de nutrientes por unidade de área e o aumento da tecnologia empregada nos fertilizantes é crucial para evitar perdas durante e após a aplicação de fertilizantes.

Desde a década de 1920 pesquisadores de vários países estudam substâncias a serem adicionadas aos fertilizantes nitrogenados para diminuir as perdas por volatilização ou lixiviação, esses fertilizantes que contém algum

substância para aumentar sua eficiência e diminuir perdas são chamados de fertilizantes de eficiência aumentada (FEA) e seu uso ainda é pouco difundido no Brasil.

O conceito de FEA foi introduzido quando um produto nitrogenado de liberação lenta foi patenteado em 1924 na Europa (TIMILSENA, 2014).

A ureia é o fertilizante nitrogenado mais utilizado no Brasil por apresentar menor custo em relação à unidade de N, porém apresenta altas perdas por volatilização da amônia (NH_3), quando não se utiliza um FEA para diminuir as perdas, a melhor alternativa é a incorporação do fertilizante ao solo.

Essa diminuição acentuada na volatilização ocasionada pela incorporação da ureia é consequência do aumento do contato entre o fertilizante e as partículas de solo (SANGOI et al., 2003).

As perdas também são reduzidas, quando fontes nitrogenadas com formas de N menos susceptíveis à volatilização são usadas (COSTA et al., 2003).

Para ocorrer a volatilização da amônia através da aplicação de ureia fertilizante ao solo faz-se necessário a presença de dois fatores primordiais no solo: umidade e presença da enzima urease. Esses fatores são essenciais para que ocorra a hidrólise da molécula de ureia.

A urease é uma grande metaloproteína heteropolimétrica caracterizada pela presença de dois núcleos centrais de Ni^{2+} e três sítios ativos independentes (BENINI et al., 2004).

Alguns compostos químicos, entre eles o NBPT (tiofosfato de N-butiltriamida), têm sido misturados à ureia com o objetivo de diminuir a velocidade da hidrólise dessa molécula, por meio da inibição da atividade da urease (TASCA et al., 2011).

Os solos apresentam diferenças quanto às perdas de N proveniente da amônia em função da umidade inicial e da composição mineralógica da fração argila (COSTA et al., 2004).

O processo de nitrificação transforma o N da forma amoniacal para a forma nítrica. No solo tem-se um predomínio de cargas negativas e o nitrato (NO_3^-) por ser uma molécula com carga negativa é repelido pelos coloides do solo e permanece na solução do solo, sendo portanto lixiviado com facilidade. Os FEA que têm a presença de inibidores da nitrificação são usados para manter o N na forma amoniacal e diminuir as perdas por lixiviação.

Fatores como sistema de preparo do solo, tipo de solo e forma de aplicação dos fertilizantes nitrogenados, podem influenciar tanto o fluxo de água quanto a concentração de nitrato na solução do solo (SANGOI et al., 2003). Sendo que quanto maior o fluxo de água ou maior a concentração de nitrato na solução do solo maiores serão as perdas por lixiviação.

Muitos trabalhos estão sendo realizados com a presença de micronutrientes no grânulo de ureia, assim tem-se um fertilizante estabilizado que vai diminuir as perdas de N por volatilização, além de fornecer o micronutriente para absorção vegetal.

Neste estudo buscou-se quantificar a eficiência de fertilizantes nitrogenados estabilizados com a presença de inibidores da enzima urease (pelo uso de micronutrientes) e inibidores do processo de nitrificação do N, aplicados em superfície na cultura do milho sob sistema de plantio direto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do milho

O milho é uma planta monocotiledônea da família poaceae, originário das Américas, contemplando várias espécies do gênero *Zea*. A espécie estudada neste trabalho é a *Zea mays*, que é uma espécie plantada praticamente em todo território brasileiro e de extrema importância econômica e social para o país, sendo grande parte da produção exportada.

Fisiologicamente, o milho é uma planta classificada como metabolismo C4, produzindo alta quantidade de massa seca. As plantas C4 praticamente não apresentam saturação luminosa fotossintética e isso permite um melhor aproveitamento da energia luminosa disponível em zonas tropicais, onde altas intensidades de luz predominam por praticamente todo o ano (PIMENTEL, 1998).

O milho é utilizado para consumo humano, como milho verde (*in natura*), amido de milho ou como base para produção de vários outros alimentos. Por conter alto teor de carboidrato é utilizado como base para produção de ração animal.

Cerca de 70% da produção mundial de milho é destinada à alimentação animal, podendo este percentual chegar a 85%, em países desenvolvidos. O milho não possui apenas aplicação alimentícia, ao contrário, os usos dos seus derivados estendem-se às indústrias química, farmacêutica, de papéis, têxtil, entre outras de aplicação ainda mais nobres (PAES, 2006).

O milho é considerado um alimento energético para as dietas humana e animal, devido à sua composição predominantemente de carboidratos (amido) e lipídeos (óleo), a composição média dos grãos em base seca é 72% de amido, 9,5% de proteínas, 9% de fibras e 4% de óleo (PAES, 2006).

O milho é cultivado no Brasil em duas safras, a primeira safra é plantada no início da época chuvosa, variando de outubro a dezembro na maioria das regiões, exceto no nordeste e em alguns estados do norte, onde é plantada mais tardiamente, variando de dezembro a março.

A segunda safra, também chamada de safrinha, é plantada logo após a colheita da primeira safra. O plantio ocorre geralmente entre janeiro e março, contudo no nordeste e em algumas regiões do norte se estende de março a junho.

A área do Brasil plantada com milho (1ª e 2ª safra) em 2013/2014 foi de 15.828,9 mil hectares (ha), com uma produtividade média de 5.057 kg ha⁻¹, obtendo-se uma produção total de 80.051,7 mil toneladas; já na safra 2014/2015 a área plantada foi de 15.743,7 mil ha, produtividade média de 5.382 kg ha⁻¹ e produção total 84.729,2 mil toneladas (CONAB, 2015).

Comparando a safra 2013/2014 com a safra 2014/2015, percebe-se que houve uma pequena redução na área plantada, porém a produtividade e a produção final aumentaram. Essa menor produtividade na safra 2013/2014 foi ocasionada principalmente por adversidades climáticas, como falta ou má distribuição de chuvas.

De acordo com dados da primeira safra 2014/2015, Minas Gerais (MG) é o estado com maior área plantada de milho do Brasil (1.022,4 mil ha), apresentou produtividade de 5.340 kg ha⁻¹ e produção 5459,6 mil toneladas. Na segunda safra 2014/2015 apresentou 255,2 mil ha de área plantada, produtividade de 5.505 kg ha⁻¹ e produção de 1.404,9 mil toneladas (CONAB, 2015).

A região sul do Brasil, com destaque para o Rio Grande do Sul (RS), é responsável pela maior produção de milho de primeira safra no país, contabilizando 14.045,5 mil toneladas na safra 2014/2015. Já na segunda safra, a região centro-oeste, com destaque para o estado de Mato Grosso (MT), é responsável pela maior produção de milho, com 36.836 mil toneladas na safra 2014/2015 (CONAB, 2015).

Ressalta-se que essas grandes regiões produtoras de milho do país, como MT, RS e MG fazem uso em larga escala do sistema de cultivo mínimo, como o plantio direto, onde preserva-se a palhada sobre o solo, sem removê-la a cada safra, é um método eficiente de cultivo que conserva e preserva o solo, pois dentre outros benefícios, evita erosões, preserva a estrutura do solo e mantém um suprimento constante de matéria orgânica e nutrientes para o solo.

2.2 Nitrogênio

Depois do carbono (C), N é o elemento requerido em maiores quantidades pelas plantas, cerca de 1-5% da massa seca total das plantas consiste de N, que é um componente integrante das proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, coenzimas, fitormônios e metabolismo secundário (MARSCHNER, 2012).

As plantas captam C do ar para seu metabolismo na forma de dióxido de carbono, já o N é absorvido pelas plantas predominantemente na forma de amônio (NH_4^+) ou nitrato, ou seja, os vegetais não absorvem N orgânico. Os restos vegetais e animais que entram em decomposição tem em suas composições o N orgânico, após acontecer o processo chamado mineralização, o N orgânico é transformado em N mineral, podendo assim ser absorvido pelas plantas.

Dentre os fatores que influenciam a mineralização do N de resíduos orgânicos estão o teor de N, a relação entre carbono e nitrogênio (C/N), o grau de maturação e a biodegradabilidade de C do material, além da textura do solo (HÉBERT et al., 1991).

O processo inverso à mineralização é chamado de imobilização, que é a transformação do N mineral a N orgânico, é uma perda temporária de N mineral, pois este é consumido pelos microrganismos do solo e imobilizado em sua biomassa microbiana, e logo após a morte e decomposição desses microrganismos inicia-se o processo de mineralização e o N volta a forma mineral.

O efeito da imobilização microbiana sobre o rendimento vegetal depende, entretanto, da quantidade de N imobilizada, da disponibilidade de N no solo, e da época de maior imobilização relativamente à demanda vegetal. Com o transcorrer da decomposição, a relação C:N diminui e a quantidade de N imobilizada passa a ser menor que a mineralizada. A melhor maneira de evitar um possível prejuízo causado pela imobilização microbiana no rendimento vegetal consiste, no entanto, em adicionar uma quantidade maior de N na semeadura da cultura de interesse econômico (ERNANI, 2005).

Portanto saber a relação C/N do material orgânico adicionado ao solo é crucial para o manejo do fornecimento de N para as plantas, sendo que quanto maior a relação C/N, mais demorado será a decomposição do material e consequente liberação de N mineral para o solo.

O fornecimento de N pelo processo de mineralização do solo não é suficiente para suprir a demanda pelas plantas nos sistemas de cultivo de alta produtividade, faz-se necessário então o uso de altas doses de N via fertilizante mineral, que devem ser manejados e aplicados de forma correta, na época ideal e na dose recomendada, para evitar perdas.

O maior reservatório de N no solo é a matéria orgânica, portanto a sua quantidade presente no solo é a principal base para se calcular a dose de N necessária a se aplicar na adubação, porém faz-se necessário também levar em consideração a expectativa de produção da cultura, ou seja, quanto maior a expectativa de produção, maior será a dose de N recomendada, e a quantidade de N que a cultura plantada anteriormente na mesma área irá contribuir com a adição de N ao solo, pelo processo de ciclagem de nutrientes.

Durante o ano de 2014 no Brasil foram consumidos 3.871.997 toneladas de N na forma de fertilizantes. A produção nacional foi de 698.450 toneladas de N para fins fertilizantes, sendo 54,7% dessa produção na forma de ureia. O país importou 3.730.194 toneladas de N na forma de fertilizantes ou matéria-prima

para a fabricação de fertilizantes nitrogenados e exportou 48.566 toneladas de N na forma de fertilizantes (ANDÁ, 2014).

Extração de nutrientes pela planta é a passagem do nutriente presente no solo para o interior da planta, ou seja, é o que foi absorvido. Exportação de nutrientes é a quantidade extraída que foi levada para outro local por ocasião da colheita. Restituição é o nutriente que foi extraído e posteriormente devolvido ao solo, ou seja, há uma ciclagem do nutriente.

Segundo Coelho (2006) há extração média de 187 kg ha⁻¹ de N para produtividades de 9,17 t ha⁻¹ de grãos; e extração de 230 kg ha⁻¹ de N para produtividade de 17,13 t ha⁻¹ de silagem (massa seca). A planta de milho transloca 70 a 77% do N absorvido para os grãos, ou seja, há grande exportação do N ao se colher os grãos de milho.

2.3 Volatilização de nitrogênio

A perda de N na forma de gás é comum com o uso de alguns fertilizantes nitrogenados. A principal forma de perda é a amônia, mas também pode ocorrer na forma de N₂ (nitrogênio elementar), NO (óxido nítrico) e N₂O (óxido nitroso).

A perda de nitrogênio da forma de amônia (N-NH₃) ocorre quando uma molécula de amônio reage com uma hidroxila (OH⁻) formando amônia e água.

A perda na forma de nitrogênio elementar, óxido nítrico e óxido nitroso ocorre mediante a ação de bactérias desnitrificantes, processo conhecido como desnitrificação. É um processo de redução do N que ocorre em condições anóxicas (ausência de oxigênio), sendo, portanto, um processo comum de ocorrência em áreas alagadas e/ou compactadas.

A desnitrificação é o principal processo biológico pelo qual o N presente no interior dos solos retorna à atmosfera. Esse processo é realizado por grande

número de espécies de bactérias anaeróbicas facultativas, as quais, na ausência de O_2 , utilizam o nitrato como receptor de elétrons (SOUSA, 2008).

O óxido nitroso é um importante gás do efeito estufa, com um alto potencial de provocar o aquecimento global. Grande parte dos fluxos naturais de óxido nitroso ocorre a partir dos oceanos, enquanto o restante é resultado principalmente da contribuição de processos microbiológicos (nitrificação e desnitrificação) ocorridos em solos de regiões tropicais (CARMO et al., 2005).

Estudos de Rojas et al. (2012) evidenciam valores de 1 a 3% de volatilização acumulada de amônia na cultura do milho sob preparo convencional e 14 a 18% quando em plantio direto, para doses de 80 e 160 kg ha⁻¹ de N, respectivamente aplicados na forma de ureia sobre a superfície do solo. A maior perda no sistema de plantio direto pode ser relacionada à maior atividade da enzima urease na camada superficial do solo.

De acordo com Tasca et al. (2011) nas condições de temperatura ambiente 35°C e aplicação de ureia sobre a superfície do solo a perda máxima de amônia pode atingir 50% do N aplicado.

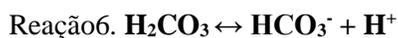
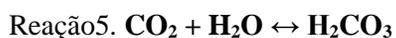
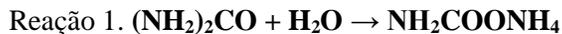
A incorporação do fertilizante ao solo diminui a volatilização, pois aumenta o contato entre o fertilizante e o solo, favorecendo a adsorção de amônio às cargas negativas. Além disto, ao se difundir para a atmosfera, a amônia encontra sítios com valores de pH menores que aqueles existentes ao redor dos grânulos e se transforma em amônio, que não é volátil (SANGOI et al., 2003).

O fertilizante nitrogenado mais utilizado no Brasil é a ureia $(NH_2)_2CO$, que após aplicada ao solo sofre hidrólise, processo dependente de uma enzima chamada urease. Essa hidrólise aumenta o pH do solo ao redor do grânulo de ureia, o que favorece o processo de volatilização da amônia, fator que deve ser levado em conta mesmo em solos com pH ácido. O pH próximo ao grânulo de ureia é o principal fator que influencia o processo de perda por volatilização de amônia (TASCA et al., 2011). Porém outros fatores como umidade, temperatura,

capacidade de troca de cátions (CTC), textura e a própria saturação da urease influenciam a taxa de hidrólise da ureia.

A alta mobilidade da ureia no solo possibilita sua fácil incorporação pela precipitação pluviométrica, que ocorre por esta ser uma molécula sem carga e, portanto, pouco adsorvida em pontos de carga da matéria orgânica ou mineral (DAWAR et al., 2011).

Reações químicas que descrevem a hidrólise da ureia e volatilização de N-NH₃:



O processo de hidrólise da ureia (reação 1) ocorre por intermédio da enzima urease na presença de água, formando carbamato de amônio (NH₂COONH₄). A urease é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinobactérias e fungos do solo ou, ainda, originada de restos vegetais (REYNOLDS et al., 1987).

Uma molécula de urease pode promover a hidrólise de cerca de 500 mil moléculas de ureia por minuto em condições ótimas, a hidrólise da ureia no solo é rápida mesmo em baixas concentrações da enzima e condições que não sejam ótimas. A velocidade máxima de reação da enzima ocorre com pH entre 7 e 8, e temperatura ótima de 55°C (SOR et al., 1971).

Ainda na presença de água, o carbamato de amônio se transforma em carbonato de amônio [(NH₄)₂CO₃] (reação 2).

Na presença de prótons (H^+), o carbonato de amônio se transforma em amônio, dióxido de carbono e água (H_2O) (reação 3), como esta é uma reação que consome prótons, há uma alcalinização do meio, ou seja, aumento de pH.

O amônio reage com uma hidroxila (OH^-) formando água e gás amônia (reação 4), sendo este um gás volátil que proporciona perda de N do solo para a atmosfera.

Na reação 4 o pH que define a constante de dissociação em soluções aquosas a $20^\circ C$ é de 9,2, ou seja, abaixo deste valor há predomínio de amônio e acima deste valor há predomínio de amônia. Apenas 0,01% de amônia é encontrada em solução com pH 5,2, aumenta para 1% com pH 7 e para 50% em pH 9,2 (CANTARELLA, 2007).

O dióxido de carbono formado na reação 3 encontra-se dissolvido em solução, sendo que parte dele reage com moléculas de água e forma ácido carbônico (H_2CO_3) (reação 5), que será dissociado formando bicarbonato (HCO_3^-) e liberando um próton (H^+) (reação 6).

A reação 6 acontece apenas em solos com pH acima de 6,3 (KOELLIKER, 1998), situação incomum para a maioria dos solos brasileiros.

A velocidade de evaporação dos fluidos do solo influencia no processo de volatilização da amônia, portanto fatores que afetam a evaporação, como temperatura do solo e velocidade do vento em sua superfície, também afetarão a taxa de volatilização de amônia.

Segundo Lara Cabezas et al. (1992) a taxa de evaporação do solo é mais importante que a condição de umidade inicial do mesmo para que ocorra volatilização de amônia.

2.4 Fertilizantes estabilizados e de liberação lenta e controlada

Além da incorporação do fertilizante ao solo, uma outra alternativa para aumentar a eficiência das adubações nitrogenadas e diminuir perdas é o parcelamento da dose recomendada. Outra alternativa eficiente para diminuir perdas por volatilização ou lixiviação de fertilizantes nitrogenados seria usar fontes que liberam o N de forma gradual ou controlada para o solo, que são os FEA, dividindo-se em fertilizantes de liberação lenta, controlada e estabilizados.

Fertilizante de liberação lenta ou controlada é um fertilizante que contém um nutriente de plantas em uma forma que atrasa a sua disponibilidade para absorção e uso pelas plantas após da aplicação ou que estende significativamente a sua disponibilidade para as plantas por um período maior que de um fertilizante que disponibiliza rapidamente o nutriente, chamado de fertilizante referência (tais como nitrato de amônio, ureia, fosfato de amônio ou cloreto de potássio) (TRENKEL, 2010).

Oficialmente não há diferença entre fertilizantes de liberação lenta e liberação controlada, contudo, produtos que contenham N e sofrem decomposição microbiológica, como ureia formaldeídos, são comumente relatados no comércio como liberação lenta; e produtos revestidos ou encapsulados são chamados de liberação controlada (TRENKEL, 1997).

Segundo Vieira e Teixeira (2004), fertilizantes revestidos por polímeros comparados com o uso de fertilizantes sem revestimento, não diferem quanto a época de aplicação, diferindo somente quanto a eficiência da adubação, pois fertilizantes com polímeros conferem menores perdas de nutrientes, possibilitando reduzir a dose aplicada (ZAHRANI, 2000).

Fertilizante nitrogenado estabilizado é um fertilizante ao qual foi adicionado uma substância estabilizadora do N, a qual estende o tempo do N na forma em que fora aplicado (TRENKEL, 2010). Sendo duas as principais classes

de estabilizadores de N encontradas no mercado: inibidores da nitrificação e inibidores da urease.

Os inibidores de nitrificação, tais como Nitrapirina (2-cloro-6-(triclorometil) piridina) e DMPP (3,4-dimetilpirazolfosfato), diminuem a taxa de nitrificação ao interferir na atividade de bactérias do grupo das *Nitrosomonas*, bloqueando a transformação da amônia em nitrito (NO_2^-), preservando assim, por algum tempo, o N na forma amoniacal, menos sujeito a perdas por lixiviação (CANTARELLA, 2007).

Dentre os inibidores da enzima urease destacam-se alguns íons metálicos, tais como: cobre (Cu), molibdênio (Mo), cobalto (Co), zinco (Zn), manganês (Mn), prata (Ag), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg) (SOR et al., 1968). A utilização de inibidores que são nutrientes de plantas é favorável, pois o próprio inibidor pode ser absorvido pelas plantas e utilizado em seu metabolismo normalmente, sem deixar resíduos no solo.

Com a incorporação de cobre e boro na ureia pastilhada para inibir a atividade da urease, Stafanato et al. (2013) consideraram esses inibidores efetivos em reduzir as perdas de N por volatilização de amônia, reduzindo-as em até 54%, quando comparada com a ureia granulada comercial.

Estudos de Scivittaro et al. (2010) evidenciam que o uso de ureia com NBPT, que é um inibidor da urease, reduziu as perdas por volatilização de amônia em 83 e 88%, para condições de solo saturado e úmido, respectivamente, em relação ao uso de ureia convencional na cultura do arroz.

Há uma maneira de se aumentar a eficiência dos fertilizantes que contêm inibidores de urease, que é a adição de compostos químicos hidrofóbicos ao fertilizante, tais como: óleo, cera ou vaselina. Trabalho de SOR et al. (1971) relatou que embora a função dos compostos químicos hidrofóbicos não seja totalmente conhecida, acredita-se que eles reduzem a taxa de dissolução da ureia

nos solos, mantendo assim o inibidor em contato mais próximo da ureia por um período maior.

Os FEA são mais convenientes de armazenar e manusear; o revestimento torna os fertilizantes menos higroscópicos e conseqüentemente menos sensíveis à umidade do ambiente que é comumente encontrada em condições de armazenamento (TIMILSENA, 2014).

Autores sugerem que com o uso dos FEA pode-se aplicar uma dose menor de N, em relação a aplicação de ureia convencional: em geral, os estudos mostram que a produtividade das culturas pode ser mantida utilizando-se ao redor de 70-80% da dose de N, em relação à dose dos produtos comumente utilizados (Blaylock, 2007).

A maioria dos trabalhos com os FEA foram desenvolvidos em outros países, sob condições diferentes das brasileiras, o que torna necessária a condução de experimentos em condições edafoclimáticas brasileiras, em especial regiões que apresentem grande potencial agrícola, a exemplo da região do cerrado brasileiro. Tais trabalhos são de extrema importância, pois permitem estabelecer relações custo-benefício, bem como quantificar a eficiência agrônômica da adubação, validando, dessa forma o emprego desse tipo de fertilizante (GIRARDI; MOURÃO FILHO, 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na área experimental do Centro de Desenvolvimento Tecnológico em Agropecuária da Universidade Federal de Lavras, no município de Lavras, MG. A cultura do milho foi conduzida de 15/11/2013 a 07/05/2014, sem irrigação. A área central do experimento encontra-se nas coordenadas geográficas 21°12'12,60"S e 46°58'41,73"W, com altitude média de 935 m e o relevo local caracterizado como plano. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico A moderado, de textura argilosa (EMBRAPA, 2013).

O clima da região é do tipo Cwb, clima tropical úmido com inverno seco e verão temperado, segundo classificação de Köppen. O clima apresenta duas estações bem definidas, sendo uma seca, que corresponde aos meses de maio a setembro, e outra chuvosa, relativa ao período de outubro a abril. A temperatura média anual é de 19,3°C com precipitação média de 1493 mm.

Os dados climáticos de temperaturas máxima e mínima, precipitação e umidade relativa do ar são apresentados no Gráfico 1.

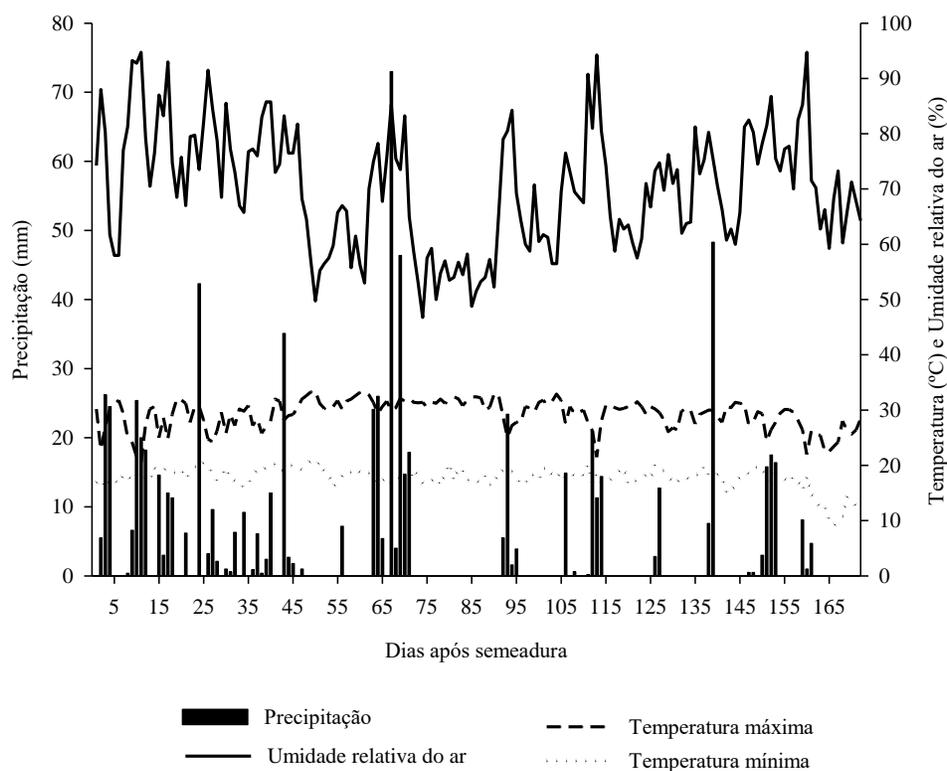


Gráfico 1 Condições climáticas durante o desenvolvimento do experimento: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e umidade relativa do ar. Fonte: estação climatológica principal de Lavras, 5° Distrito de Meteorologia

A área é cultivada sob o sistema de plantio direto há aproximadamente 20 anos, com consórcio de milho, soja e feijão. Antes da implantação do experimento a área foi cultivada com feijão.

Antes da implantação do experimento foram coletadas amostras de solo para caracterização química (camadas de 0-0,05 m, 0-0,20 m e 0,20-0,40 m) e textura do solo (camadas 0-0,05 m, 0-0,20 m e 0,20-0,40 m), cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Atributos químicos (camadas de 0-0,05 m, 0-0,20 m e 0,20-0,40 m) e textura (camadas 0-0,05 m, 0-0,20 m e 0,20-0,40 m) do Latossolo Vermelho Amarelo. Lavras, MG, 2014

Camada	pH	P (Melich-1)	K⁺	S	B	Zn	Cu	M.O.	
m	H₂O	-----mg dm ⁻³ -----						dag kg⁻¹	
0-0,05	5,7	25,3	134	13,7	0,27	9,70	0,6	3,56	
0-0,20	5,2	6,16	60	31,31	0,17	2,52	0,7	3,56	
0,20-0,40	5,2	2,91	46	26,57	0,13	2,05	0,4	2,61	

Camada	P-rem	Ca²⁺	Mg²⁺	Al³⁺	(H + Al)	SB	t	T	V
m	mg L⁻¹	-----cmol _c dm ⁻³ -----							
0-0,05	16,30	4,17	1,25	0,1	4,67	5,70	5,80	10,37	55,14
0-0,20	14,17	1,83	0,53	0,4	6,30	2,51	2,91	8,81	28,52
0,20-0,40	13,33	1,45	0,36	0,3	5,05	1,93	2,23	6,98	27,63

Camada	Argila	Silte	Areia
m	-----dag kg ⁻¹ -----		
0-0,05	50	6	44
0-0,20	50	5	45
0,20-0,40	51	7	42

3.2 Delineamento Experimental

Foi utilizado delineamento experimental em blocos casualizados com arranjo em faixas. A parcela experimental foi composta por 4 linhas de 4 m de comprimento cada, espaçadas 0,6 m. A área útil considerada para as avaliações foi de 3,6 m². A bordadura foi composta por duas linhas laterais e 0,5 m das extremidades das duas linhas centrais. Foram estudados 12 tratamentos (11 com fertilizantes e 1 sem fertilizante – controle) e 3 repetições, totalizando 36 parcelas experimentais.

3.3 Caracterização dos fertilizantes e dos tratamentos

Abaixo são descritos os fertilizantes utilizados no experimento e suas respectivas formulações. Os micronutrientes B, Zn, Cu e Mo foram adicionados a ureia na forma de ácido bórico, óxido de zinco, óxido de cobre e ácido molíbdico respectivamente. Alguns fertilizantes contêm polímeros aniônicos (PA) em sua formulação.

- 1) Ureia + PA (41,6% N; 3% Cu):** 1kg ureia; 6mL polímero N1; 40,5g Cu; 34,5g polímero N3; este tratamento forneceu 10,8 kg ha⁻¹ de Cu;
- 2) Ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu):** 1kg ureia; 6mL polímero N1; 20,5g Cu; 54,5g polímero N3; este tratamento forneceu 5,4 kg ha⁻¹ de Cu;
- 3) Ureia + PA (41,6% N; 3% Zn):** 1kg ureia; 6mL polímero N1; 45g Zn; 30g polímero N3; este tratamento forneceu 10,8 kg ha⁻¹ de Zn;
- 4) Ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn):** 1kg ureia; 6mL polímero N1; 22,5g Zn; 52,5g polímero N3; este tratamento forneceu 5,4 kg ha⁻¹ de Zn;

- 5) Ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B):** 1kg ureia; 6mL polímero N1; 75g FHCuB (13,6% B; 5% Cu); este tratamento forneceu 1,2 kg ha⁻¹ de Cu e 3,4 kg ha⁻¹ de B;
- 6) Ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B):** 1kg ureia; 6mL polímero N1; 55g FHCuB (13,6% B; 5% Cu); 20g polímero N3; este tratamento forneceu 0,9 kg ha⁻¹ de Cu e 2,4 kg ha⁻¹ de B;
- 7) Ureia + PA (41,6% N):** 5kg de ureia; 30 mL polímero F1; 300g polímero F2; 75g polímero F3;
- 8) Ureia (44,3%N; 0,15%Cu; 0,4%B):** este tratamento forneceu 0,5 kg ha⁻¹ de Cu e 1,3 kg ha⁻¹ de B;
- 9) Ureia (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo):** este tratamento forneceu 0,3 kg ha⁻¹ de Cu, 1,0 kg ha⁻¹ de B e 0,1 kg ha⁻¹ de Mo;
- 10) Ureia perolada (46% N):** ureia fertilizante convencional perolada;
- 11) Ureia + 0,8% DMPP (45% N):** DMPP (3,4-dimetilpirazolfosfato) é uma molécula inibidora do processo de nitrificação do N no solo, fazendo com que o N se mantenha na forma amoniacal; a concentração de DMPP na ureia é de 0,8%;
- 12) Controle (sem ureia):** neste tratamento não foi aplicado N em cobertura, apenas a adubação de semeadura como todos os outros tratamentos.

3.4 Semeadura e Tratos Culturais

A semeadura do milho foi realizada dia 15/11/2013 e foi utilizado o híbrido simples: DKB 390 VT Pro® 2. O espaçamento utilizado foi de 0,6 m entre linhas obtendo-se um estande final de aproximadamente 77.089 plantas por ha.

A adubação de semeadura foi realizada mecanicamente e recomendada em função da análise de solo e recomendações segundo FANCELLI (2010). Na

adubação de semeadura foram aplicados 425 kg ha⁻¹ do fertilizante 8-28-16 (N-P-K), obtendo-se a dose de 34 kg ha⁻¹ de N, 119 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 68 kg ha⁻¹ de K₂O.

A adubação de cobertura com os fertilizantes nitrogenados (tratamentos) foi realizada distribuindo-se manualmente os fertilizantes em faixas a 10 cm das plantas na dose de 150 kg ha⁻¹ de N, sem parcelamento, quando as plantas apresentavam 5 folhas completamente expandidas (estádio V5), que ocorreu aos 29 dias após a semeadura (13/12/2013).

Aos 34 dias após a semeadura (18/12/2013) foi realizada a adubação potássica, com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio (KCl).

Foi realizada a aplicação de glifosato (9 mL L⁻¹ de calda), herbicida sistêmico e não seletivo, aos 22 dias após a semeadura (06/12/2013) de forma mecanizada. E aos 43 dias após a semeadura (27/12/2013) com uso de pulverizador costal foram aplicados Atrazina® (15 mL L⁻¹ de calda) e Soberan® (1 mL L⁻¹ de calda), ambos herbicidas seletivos de ação sistêmica.

A colheita das parcelas para avaliações ocorreu aos 174 dias após a semeadura (07/05/2014).

3.5 Avaliações

3.5.1 Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia

Para quantificação da volatilização de amônia foi utilizado o método do coletor estático semiaberto (NÔMMIK, 1973). Foram utilizados tubos de PVC para confecção das bases e das câmaras.

As bases têm 20 cm de diâmetro e 20 cm de altura e foram enterradas no solo a uma profundidade de 10 cm e fixas durante todo o experimento, cada parcela experimental continha 3 bases (Figura 1).



Figura 1 Bases de PVC para coleta de amônia



Figura 2 Câmara coletora de amônia, tipo semiaberta

As câmaras têm 20 cm de diâmetro e 50 cm de altura e têm em seu interior 3 parafusos a 25 cm de altura e 3 parafusos a 45 cm de altura, estes parafusos têm a função de sustentar as duas espumas que ficam no interior da câmara. As câmaras foram inseridas 5 cm sobre as bases, de modo a vedar qualquer espaço entre elas, cada parcela experimental continha uma câmara que era trocada entre as bases a cada coleta e troca de espuma. Sobre as câmaras foi colocado uma tampa para bloquear a entrada de água (Figura 2).

Foram utilizados dois discos de espuma laminada por câmara, com densidade de $0,02 \text{ g cm}^{-3}$ e 2,5 cm de espessura cortados com o mesmo diâmetro do tubo (20 cm). As espumas foram embebidas com 85 mL de solução de ácido fosfórico (H_3PO_4) e glicerina nos volumes de 50 ml L^{-1} e 40 ml L^{-1} , respectivamente. A espuma superior possui a função de evitar a contaminação da espuma inferior e esta é utilizada para determinação da amônia volatilizada. As espumas foram coletadas no 1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 7º, 10º, 14º, 17º, 22º e 27º dias após a adubação nitrogenada de cobertura (13/12/2013), e logo após as coletas eram colocadas espumas novas no lugar.

A espuma inferior era levada ao laboratório logo após a coleta e sua solução extraída por meio de filtragem em funil de Büchner com auxílio de uma bomba de vácuo, cada espuma passava por 5 lavagens sequenciais com 80 mL de água deionizada cada lavagem. A partir do extrato foram retiradas alíquotas para destilação pelo método de Kjeldahl e posterior titulação da amostra destilada para determinação do teor de N.

3.5.2 Análise foliar

Aos 71 dias após a semeadura (24/01/2014) foram coletadas 5 folhas dentro de cada parcela para análise de N, B, Cu e Zn, sendo uma folha de cada planta. As plantas foram selecionadas de forma aleatória dentro de cada parcela e

a folha coletada foi a oposta e abaixo da espiga (MALAVOLTA et al., 1997). As folhas foram levadas ao laboratório, lavadas com água de torneira, água destilada e secas em estufa até peso constante. Posteriormente foram moídas no moinho tipo Willey e realizadas as análises.

3.5.3 Produtividade de palhada e grãos, teor e acúmulo de nutrientes na palhada e no grão

Para avaliar produtividade de palha (massa seca da parte aérea – MSPA) foram colhidas manualmente 20 plantas por parcela, cortadas rente ao solo, na época da colheita da cultura (07/05/2014), ou seja, aos 174 dias após a semeadura. A espiga foi separada da palha e esta juntamente com colmo e folhas foram moídas em triturador forrageiro, após a trituração retirou-se uma amostra de cada parcela para secagem em estufa até atingir peso constante com objetivo de calcular a umidade. Posteriormente as amostras foram moídas em moinho do tipo Willey para determinação do teor de N, B, Cu e Zn da palhada de acordo com metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). O acúmulo de determinado nutriente na palhada foi obtido pela multiplicação do teor do nutriente na palhada e a produtividade de palhada.

As espigas previamente separadas foram debulhadas e os grãos foram pesados e tiveram a umidade quantificada por um medidor portátil de umidade de grãos com posterior correção para 14% de umidade e conversão do peso para kg ha⁻¹. Posteriormente amostras dos grãos de cada parcela foram secas em estufa até atingir peso constante e moídas em moinho tipo Willey para determinação do teor de N, B, Cu e Zn, de acordo com metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). O acúmulo de determinado nutriente nos grãos foi obtido pela multiplicação entre o teor do nutriente nos grãos e a produtividade de massa seca de grãos.

3.5.4 Índices de eficiência

Com os dados de produtividade de grãos foram calculados os seguintes índices de eficiência da adubação proposto por Ladha et al. (2005):

• **Eficiência agrônômica (EA)** = [Produtividade de grãos com adubação (kg ha⁻¹) – Produtividade de grãos sem adubação (kg ha⁻¹)] / Dose de N (kg ha⁻¹).

• **Eficiência agrônômica relativa (EAR)** = {[Produtividade de grãos com adubação (kg) - Produtividade de grãos sem adubação (kg)] / Produtividade de grãos com ureia perolada convencional (kg) - Produtividade de grãos sem adubação (kg)} * 100.

A EA fornece valores em kg de grãos por kg de N aplicado. A EA é o incremento de produção que o fertilizante proporciona em relação à produção sem adubação (tratamento controle).

A EAR fornece valores em porcentagem, considerando o tratamento com ureia perolada convencional igual a 100%, os demais tratamentos poderão ter valores maiores ou menores que 100%, mostrando quanto por cento de grão determinado fertilizante produz em relação à ureia perolada convencional.

3.6 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com auxílio do programa Sisvar (FERREIRA, 2011), utilizando nível de significância 5%. As médias foram comparadas pelo teste Scott-Knott, com o mesmo nível de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia

Os picos de volatilização diária de amônia variaram entre os fertilizantes utilizados e as maiores taxas de volatilização ocorreram nos primeiros sete dias após a aplicação da adubação nitrogenada de cobertura (tratamentos) na cultura do milho, com picos entre o 2º e o 4º dia (Gráfico 2).

A volatilização diária fornece valores em porcentagem de perdas de N por volatilização de amônia em cada dia de avaliação, em relação ao total de N aplicado em cobertura, ou seja, 150 kg ha⁻¹. O ideal é que o pico diário de volatilização seja o mais distante possível da data de aplicação do fertilizante, pois quanto maior esse atraso maior será a chance de o N ser absorvido pelas plantas ou transformado em outra forma de N que não seja volátil.

As maiores taxas de volatilização diária foram 24,3%, 20,9% e 19,1% do N aplicado em cobertura, oriundas respectivamente da ureia + 0,8% DMPP (45% N), ureia + PA (41,6% N) e ureia perolada (46% N), todas no 2º dia após a adubação de cobertura (Gráfico 2).

Alguns fertilizantes apresentaram o pico máximo de volatilização no 3º dia, como a ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo), com 17,6% de volatilização do N aplicado; ureia + PA (41,6% N; 3% Cu), com 16,3% de volatilização do N aplicado; ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn), com 15,1% de volatilização do N aplicado; ureia (44,3%N; 0,15%Cu; 0,4%B), com 11,9% de volatilização do N aplicado; ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B), com 11,1% de volatilização do N aplicado, sendo todos esses, fertilizantes com a presença de um ou mais micronutriente (Gráfico 2).

O tratamento ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B) foi o mais eficiente em retardar o pico de volatilização de amônia, sendo que este ocorreu no

4º dia após a adubação de cobertura (9,6% de volatilização do N aplicado em cobertura). Dentre os 3 tratamentos utilizados com Cu e B na formulação, este tratamento é o que contém a maior concentração de ambos os micronutrientes, o que explica a maior eficiência em retardar a volatilização (Gráfico 2).

O ácido bórico (forma no qual o B está presente nos fertilizantes utilizados) se mostrou eficiente em inibir a atividade da enzima urease. O ácido bórico atua como um inibidor competitivo da enzima urease em relação à molécula de ureia, ou seja, pode ser considerado um substrato análogo à molécula de ureia. A urease caracteriza-se pela presença de dois núcleos centrais de níquel (Ni) em sua molécula; o ácido bórico fica ligado simetricamente entre os 2 núcleos de Ni, sem alterar a distância entre eles, reduzindo a atividade da enzima (BENINI et al., 2004)

A urease contém um ou mais grupos sulfidrilas como parte integral da atividade catalítica. Uma forma de inibir a atividade da urease é a combinação de um íon metálico positivo com a carga negativa gerada pelo grupo sulfidrilas da enzima. Um íon metálico bivalente (como o Cu^{2+}) tem uma afinidade maior do que dois elétrons para se juntar à carga negativa do grupo sulfidrilas. Por esse motivo o Cu é um bom inibidor da enzima urease (SHAW et al., 1953).

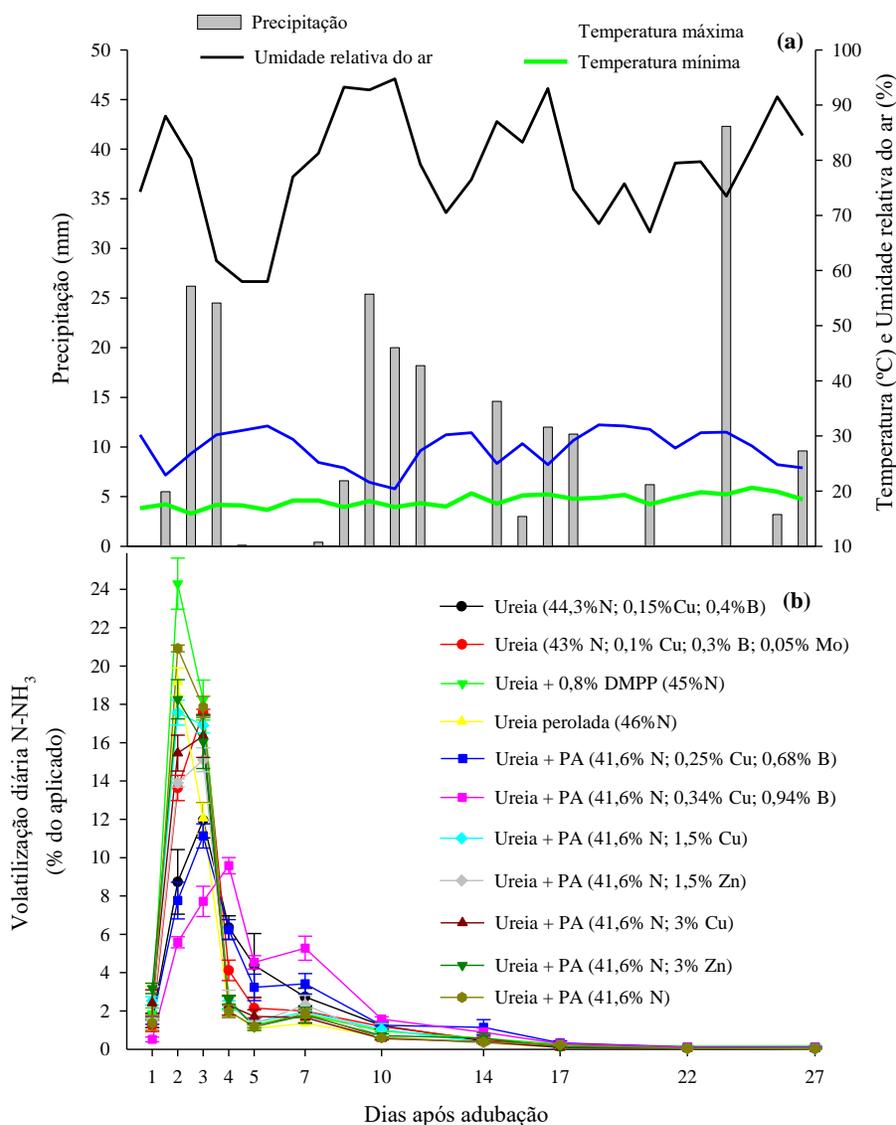


Gráfico 2 Condições climáticas durante as análises de volatilização: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e umidade relativa do ar. Fonte: estação climatológica principal de Lavras, 5º Distrito de Meteorologia (a). Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH₃) 27 dias após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Barras verticais indicam o erro padrão da média pelo teste Scott-Knott a 5% de significância (b).

As perdas acumuladas por volatilização de amônia no período de 27 dias foram influenciadas significativamente ($p \leq 0,05$) pelos fertilizantes nitrogenados utilizados (Gráfico 3).

A umidade relativa e precipitação altas durante as análises de volatilização foram fatores fundamentais para que ocorresse a hidrólise da ureia e a volatilização de amônia, junto à temperatura média em torno de 23 °C.

A sequência decrescente da perda acumulada de amônia foi: ureia + 0,8% DMPP (45% N) (52,2%) > ureia + PA (41,6% N) (46,5%) = ureia + PA (41,6% N; 3% Zn) (44,5%) = ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu) (44,3%) = ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo) (42,7%) > ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) (41%) = ureia perolada (46% N) (39,4%) = ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn) (37,7%) = ureia (44,3% N; 0,15% Cu; 0,4% B) (37,6%) = ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B) (36,2%) = ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B) (36,1%).

A maior perda acumulada por volatilização de amônia ocorreu após à aplicação da ureia + 0,8% DMPP (45% N). Aos 27 dias após a adubação de cobertura pomoveu perda acumulada de 52,2% do total de N aplicado em cobertura, o equivalente a 78,3 kg ha⁻¹ de N (Gráfico 3). A molécula do DMPP impede que o amônio (NH₄⁺) seja transformado em nitrato (NO₃⁻). Com a maior presença de amônio no solo há maior chance de formação amônia (NH₃↑), basta o íon amônio reagir com as hidroxilas (OH⁻) presentes no solo.

O DMPP é considerado o inibidor ideal do processo de nitrificação quando combinado com fertilizantes nitrogenados em sistemas de produção vegetal (Chen et al., 2014). Esse aditivo é adicionado a ureia para inibir as perdas de nitrato por lixiviação e óxido nitroso por volatilização (RUSER et al., 2015). Entretanto para reduzir as perdas de amônia por volatilização o DMPP não se mostrou eficiente. A manutenção de nitrogênio mineral na forma amoniacal em uma camada de solo, na qual o fertilizante (ureia aplicada superficialmente) entre

em contato (0-5 cm), aumenta as perdas de nitrogênio por volatilização em contrapartida à redução das perdas por lixiviação e desnitrificação. Dessa forma, dentre as desvantagens dos inibidores de nitrificação está à possibilidade de aumento das perdas de nitrogênio por volatilização quando a ureia + DMPP é aplicada na superfície do solo (Trenkel, 2010).

Os tratamentos que apresentaram perdas acumuladas intermediárias de amônia após 27 dias da adubação de cobertura foram: ureia + PA (41,6% N), ureia + PA (41,6% N; 3% Zn), ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu) e ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo), com valores de 46,5%, 44,5%, 44,3% e 42,7% do total de N aplicado em cobertura, respectivamente (Gráfico 3).

Os menores valores de perda acumulada de amônia após 27 dias da adubação de cobertura foram: ureia + PA (41,6% N; 3% Cu), ureia perolada (46% N), ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn), ureia (44,3% N; 0,15% Cu; 0,4% B), ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B), ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B) com perdas de 41%; 39,4%; 37,7%; 37,6%; 36,2% e 36,1% do total de N aplicado em cobertura, respectivamente (Gráfico 3).

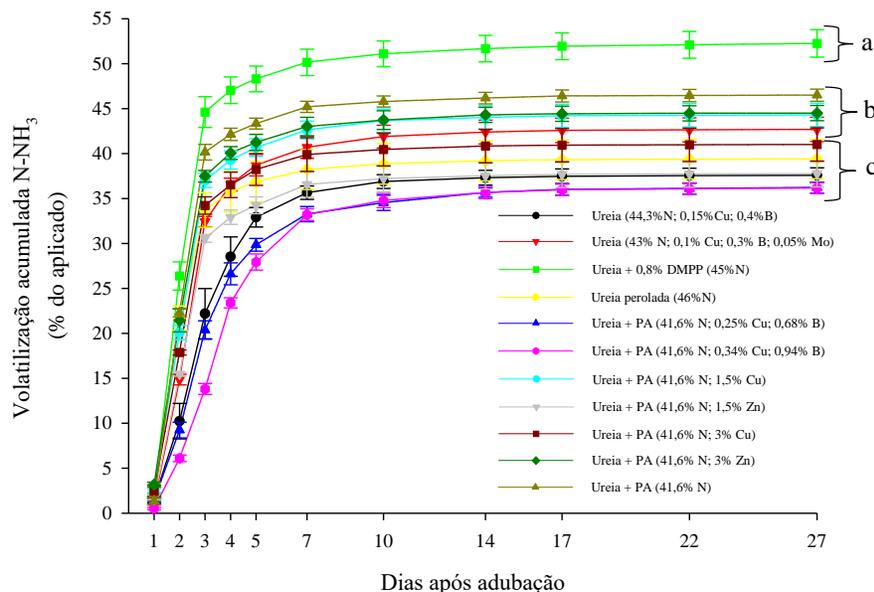


Gráfico 3 Perda acumulada de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH₃) 27 dias após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Barras verticais indicam o erro padrão da média pelo teste Scott-Knott a 5% de significância

Os três fertilizantes que contêm apenas Cu e B como inibidor da urease promoveram menor perda de nitrogênio por volatilização, com valores de perda acumulada de 37%. Resultados semelhantes foram apresentados no trabalho de Geissler (1970) que foi um dos pioneiros e gerou patente no estudo do Cu e B como inibidor da urease para diminuir a volatilização de amônia. Nesse estudo os autores avaliaram a ureia com sulfato de cobre, bórax e/ou fluoreto de sódio para inibição da urease, aplicados na superfície do solo em condições de campo. O melhor resultado foi obtido com a aplicação da ureia + 1% sulfato de cobre + 2% bórax com valor de perda acumulada de N-NH₃ de 35,1% do N aplicado 20 dias após a adubação.

A volatilização de amônia oriunda da aplicação de ureia revestida com ácido bórico e sulfato de cobre (0,4% B; 0,14% Cu) sobre palhada de milho e soja, aplicados na dose de 100 kg ha⁻¹ de N resultou na redução das perdas de amônia por volatilização quando comparadas com a ureia convencional. Os valores de volatilização acumulados após 20 dias da aplicação dos fertilizantes foram: 13,7 kg ha⁻¹ e 18 kg ha⁻¹ de amônia, com os tratamentos ureia revestida com ácido bórico e sulfato de cobre (0,4% B; 0,14% Cu) e ureia comum, respectivamente (Faria et al., 2013).

Outro estudo que gerou patente foi o de Sor et al. (1968), que dentre os fertilizantes utilizados, destaca-se o tratamento de ureia + 0,25% Cu, que apresentou 32,8% de volatilização de amônia após sete dias da aplicação em superfície do solo. Segundo esses mesmos autores, diferentes composições de fertilizantes misturados a inibidores da urease podem ser utilizados com a finalidade de diminuir a volatilização de N e afirmou que uma composição ideal do grânulo consiste essencialmente de 3% a 5% de uma cobertura de hidrocarboneto, 0,01% a 10% de um inibidor de urease e o restante composto de ureia, podendo ser o inibidor um sal solúvel ou íon metálico.

No presente estudo, dois tratamentos utilizaram apenas o Cu como inibidor, o fertilizante com maior concentração de Cu (3%) proporcionou menor volatilização (41% do N aplicado), enquanto o fertilizante com menor concentração de Cu (1,5%) proporcionou maiores perdas (44,3% do N aplicado).

O Cu é considerado eficiente em inibir a enzima urease (SOR et al., 1968). Porém o Cu pode não apresentar alta eficiência quando aplicado junto a ureia em alguns solos e uma explicação seria a difusão da ureia, que ocorre fora da zona de efeito do Cu, tornando assim este último ineficaz; o Cu é rapidamente imobilizado pelo solo, mas a ureia se move livremente com a água do solo ou por difusão (Geissler et al., 1970).

Grohs et al. (2011) relataram diminuição das perdas de amônia por volatilização ao utilizar ureia revestida com Cu (1,5% sulfato de cobre) e B (2,4% ácido bórico) no arroz irrigado em relação à aplicação de ureia convencional, na dose de 120 kg ha⁻¹ de N. A volatilização acumulada de amônia foi de 22% do N aplicado com o uso de ureia revestida com Cu (1,5% sulfato de cobre) e B (2,4% ácido bórico) enquanto a aplicação de ureia convencional resultou em 47% de perdas do N aplicado.

Dois tratamentos utilizaram apenas o Zn como inibidor e houve diferença entre eles, o fertilizante com menor concentração de Zn (1,5%) proporcionou menor volatilização (37,7% do N aplicado), enquanto o fertilizante com maior concentração de Zn (3%) proporcionou maiores perdas por volatilização (44,5% do N aplicado).

4.2 Teor foliar de nutrientes no florescimento

A adição de inibidores de urease e de nitrificação à ureia promoveram diferenças nos teores foliar de N (Gráfico 4). Já para os micronutrientes B, Cu e Zn não houve diferença significativa entre as fontes utilizadas ($p \leq 0,05$). A concentração média de todos os tratamentos para B, Cu e Zn nas folhas com base na massa seca foram, respectivamente: 8,4 mg kg⁻¹; 7,9 mg kg⁻¹ e 12,2 mg kg⁻¹. A faixa crítica de B, Cu e Zn para a cultura do milho no florescimento é, respectivamente, 15 a 20 mg kg⁻¹, 6 a 20 mg kg⁻¹ e 15 a 50 mg kg⁻¹ (Malavolta et al., 1997)

A ureia + PA (41,6% N) com 26,26 g kg⁻¹; ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo) com 25,95 g kg⁻¹; ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B) com 25,90 g kg⁻¹; ureia perolada (46% N) com 25,53 g kg⁻¹ promoveram os maiores teores foliares de N no milho, não se diferindo estatisticamente, e foram superiores à ureia + 0,8% DMPP (45% N) com 24,66 g kg⁻¹; ureia + PA (41,6%

N; 3% Zn) com 24,50 g kg⁻¹; tratamento controle com 24,33 g kg⁻¹; ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B) com 24,30 g kg⁻¹; ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn) com 24,10 g kg⁻¹; ureia (44,3%N; 0,15%Cu; 0,4%B) com 23,73 g kg⁻¹; ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu) com 23,00 g kg⁻¹ e ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) com 22,83 g kg⁻¹ (Gráfico 4).

De acordo com Malavolta et al. (1997) a faixa crítica de N foliar no florescimento para a cultura do milho é entre 27,5 e 32,5 g kg⁻¹.

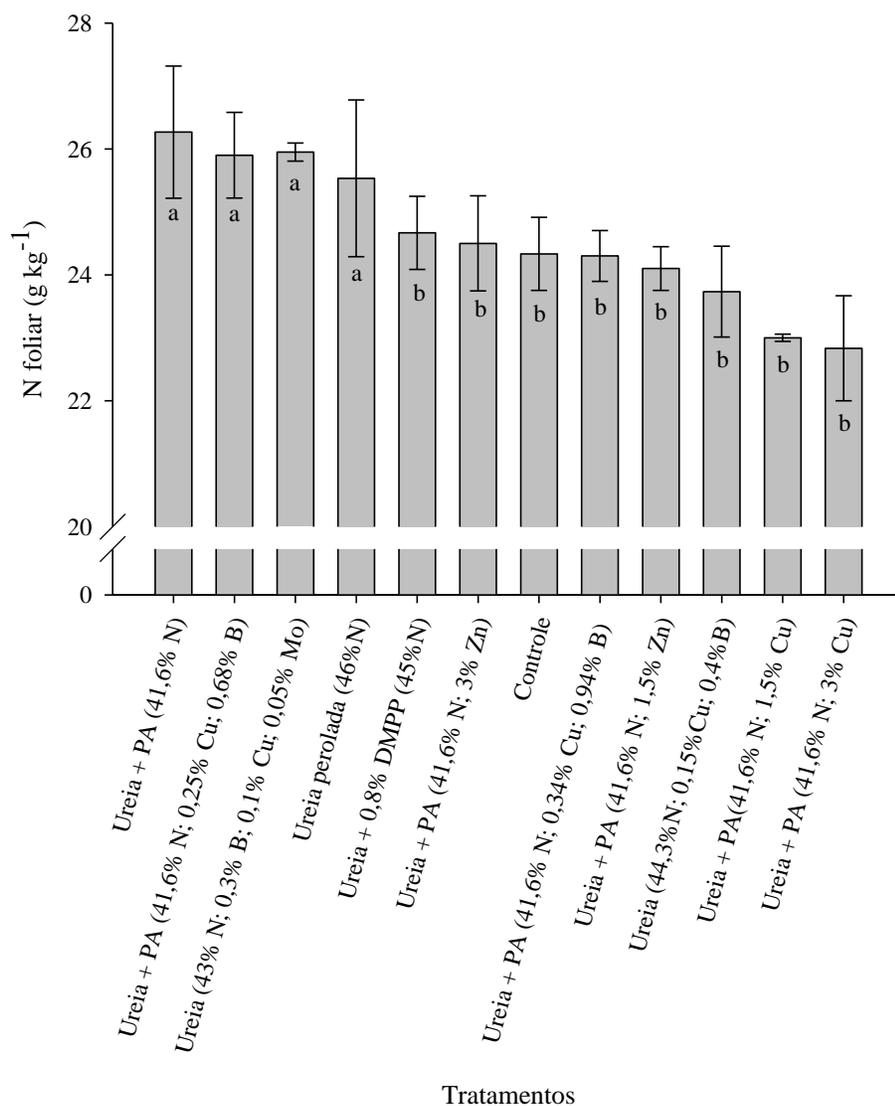


Gráfico 4 Teores foliares de nitrogênio (N) no florescimento após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014

4.3 Produtividade de palhada e grãos

A produtividade da palhada não apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos utilizadas, ficando a produção média em torno de $8,3 \text{ t ha}^{-1}$.

Os tratamentos que proporcionaram maior produtividade de grãos em ordem decrescente foram: ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) ($11,74 \text{ t ha}^{-1}$); ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B) ($11,67 \text{ t ha}^{-1}$); ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn) ($11,55 \text{ t ha}^{-1}$); Ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu) ($11,55 \text{ t ha}^{-1}$); ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B) ($11,53 \text{ t ha}^{-1}$); ureia (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo) ($11,36 \text{ t ha}^{-1}$); ureia (44,3%N; 0,15%Cu; 0,4%B) ($11,28 \text{ t ha}^{-1}$); ureia perolada (46%N) ($11,03 \text{ t ha}^{-1}$); ureia + PA (41,6% N; 3% Zn) ($11,00 \text{ t ha}^{-1}$); ureia + 0,8% DMPP (45% N) ($10,64 \text{ t ha}^{-1}$) (Gráfico 5).

O tratamento ureia + 0,8% DMPP (45% N) apresentou produtividade de $10,64 \text{ t ha}^{-1}$, 4% inferior em relação à ureia perolada ($11,03 \text{ t ha}^{-1}$). Resultados semelhantes foram reportados por Soratto et al. (2010), em que a ureia com DMPP apresentou 4,3% de redução na produção de milho cultivado em sistema de plantio direto em relação ao uso de ureia convencional.

A ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo) promoveu valor de produtividade semelhante aos demais fertilizantes estabilizados. A aplicação de Mo está intimamente ligada a adubação nitrogenada, pois o Mo é constituinte da redutase do nitrato, que é responsável pela redução do nitrato a nitrito no interior das plantas. O molibdênio exerce papel indispensável na assimilação do nitrato absorvido pelas plantas, atuando junto a redutase do nitrato. Portanto, qualquer deficiência desse nutriente pode comprometer o metabolismo do nitrogênio, diminuindo o rendimento das culturas (FERREIRA et al., 2001).

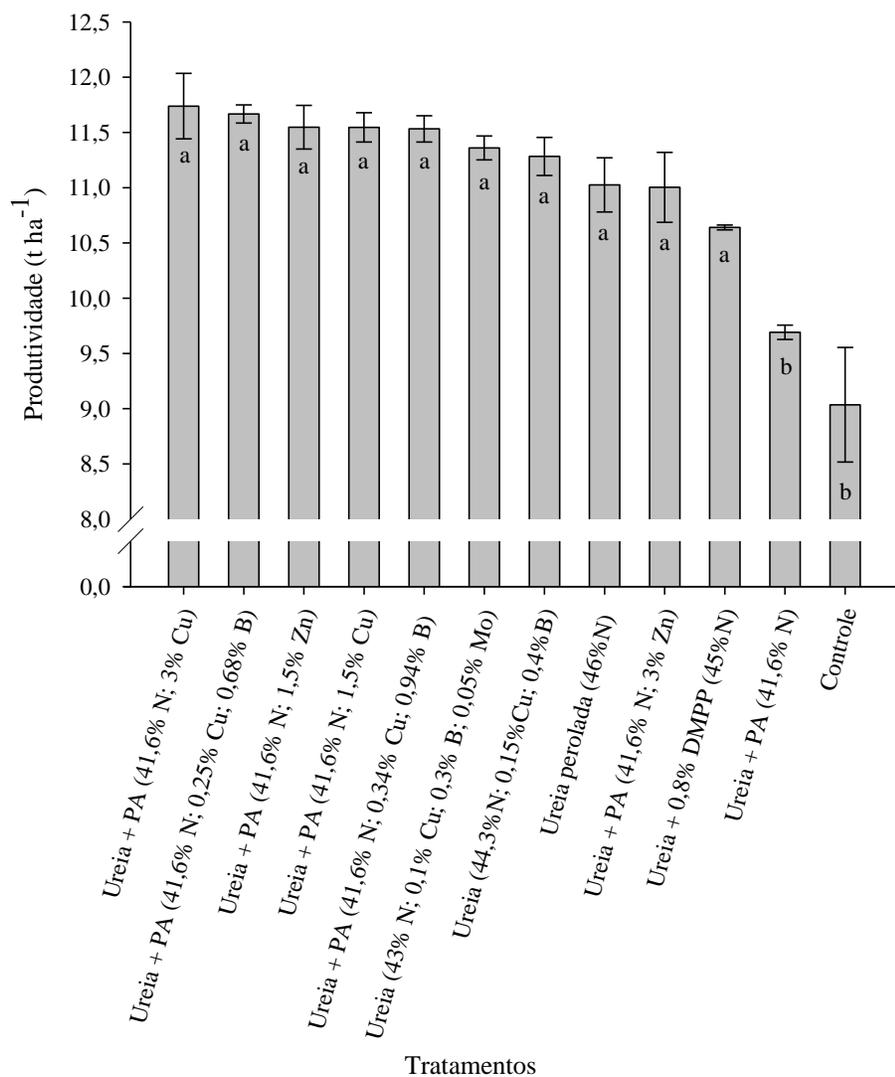


Gráfico 5 Produtividade de grãos de milho (t ha⁻¹) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014

Dois tratamentos proporcionaram menor produtividade de grãos, a ureia + PA (41,6% N) com produtividade de 9,7 t ha⁻¹ de grãos e o tratamento controle (sem aplicação de fertilizante em cobertura) com produtividade de 9 t ha⁻¹ de grãos (Gráfico 5).

A produtividade do tratamento controle, de 9 t ha⁻¹ de grãos, foi superior à produtividade média de milho (5,2 t ha⁻¹) na primeira safra 2013/2014 no estado de MG (CONAB, 2015).

Os maiores valores de produtividades em todos os tratamentos foi possível graças a alguns fatores, como: uso de sementes híbridas de alto rendimento, dose utilizada na adubação, considerada ideal para altas produtividades, e boa fertilidade inicial do solo, ocasionada pelo sistema de manejo sem revolvimento do solo (sistema de plantio direto) há 20 anos na área, o que proporcionou acúmulo de palhada sobre o solo e posterior decomposição e mineralização de seus elementos, proporcionando uma liberação lenta e contínua de nutrientes para as plantas no decorrer desse tempo.

Vale ressaltar que o manejo correto do uso de fertilizantes influencia na sua eficiência, como demonstrado no trabalho de Civardi et al. (2011), que apresenta valores de rendimento do milho sob efeito da ureia de liberação lenta (revestida com polímero) aplicada em superfície e ureia comum incorporada ao solo. Foi constatada uma maior produtividade de grãos com a ureia comum incorporada (8,3 t ha⁻¹) e menor produtividade de grãos com a ureia revestida com polímero aplicada em superfície (7,4 t ha⁻¹), ambos tratamentos na dose aproximada de 100 kg ha⁻¹ de N.

4.4 Teor e acúmulo de nutrientes na palhada e nos grãos

O N acumulado apresentou diferença entre as fontes utilizadas ($p \leq 0,05$) apenas para grão e total. O N acumulado na MSPA apresentou valor médio de $47,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (Gráfico 6).

Estudo de Cancellier (2013) mostrou variações de acúmulo desde 61 kg ha^{-1} de N para tratamento controle a 82 kg ha^{-1} de N com aplicação fertilizantes nitrogenados para a MSPA do milho sob sistema de plantio direto na cidade de Lavras-MG.

Dois tratamentos proporcionaram menor acúmulo de N nos grãos, são eles: controle com $106,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de N e ureia + PA (41,6% N) com $117,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (Gráfico 6).

Os demais tratamentos apresentaram acúmulo superior de N no grão, como a ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) com $144,4 \text{ kg ha}^{-1}$, sendo este o tratamento que apresentou maior produtividade de grãos ($11,7 \text{ t ha}^{-1}$ de grãos) (Gráfico 6).

O N acumulado total apresentou a seguinte ordem decrescente de acúmulo: ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo) com $191,6 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu) com $191,0 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B) com $190,3 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) com $189,0 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia + PA (44,3% N; 0,15% Cu; 0,4% B) com $188,7 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia perolada (46% N) com $187,1 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn) com $183,9 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B) com $182,4 \text{ kg ha}^{-1}$ > ureia + PA (41,6% N) com $174,3 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia + 0,8% DMPP (45% N) com $172,6 \text{ kg ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 3% Zn) com $168,2 \text{ kg ha}^{-1}$ > tratamento controle com $151,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (Gráfico 6).

Ressalta-se que o N se acumula muito mais no grão do que na MSPA da planta de milho, portanto a exportação de N é muito grande na colheita de grãos e ainda maior quando se retira também a palhada da lavoura.

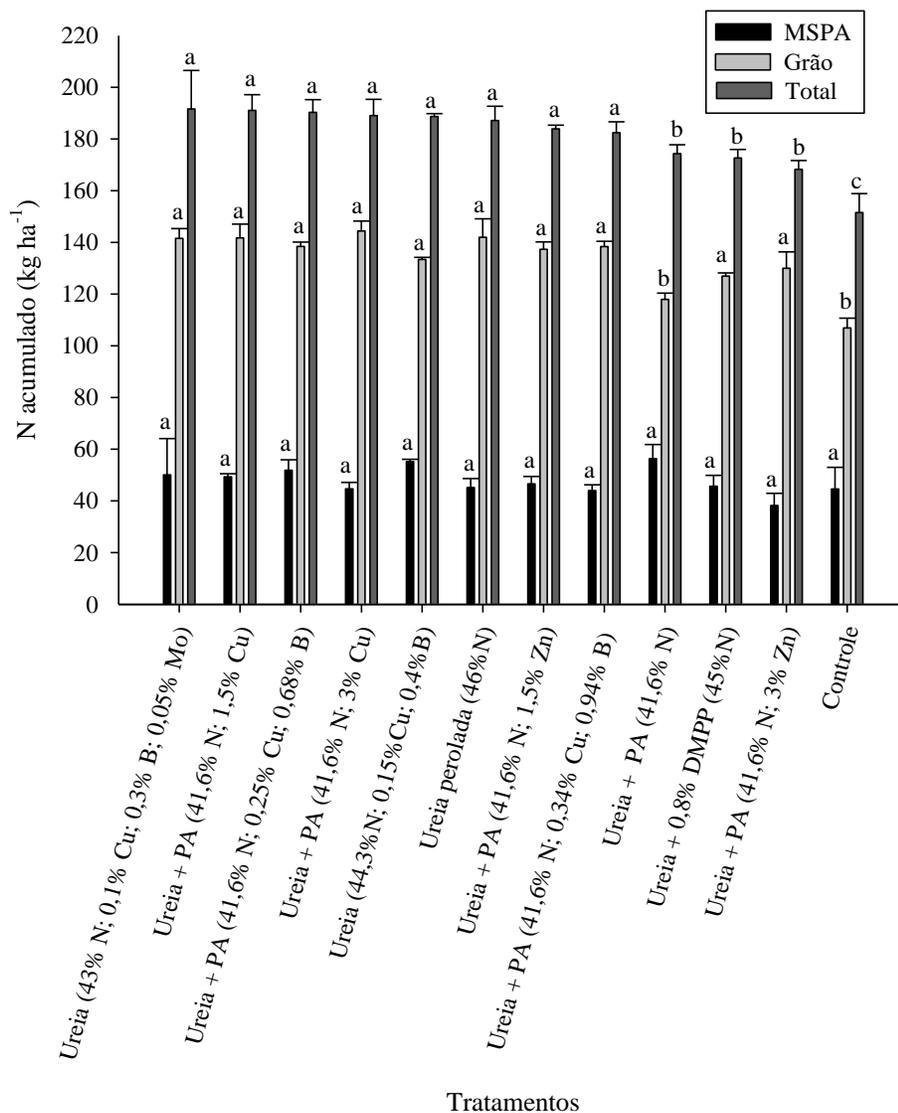


Gráfico 6 Nitrogênio acumulado (kg ha⁻¹) na massa seca da parte aérea (MSPA), grãos e total após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014

O N é o macronutriente mais acumulado nos grãos de milho e consequentemente o mais exportado pela colheita. Em média são exportados 15,8 kg de N por tonelada de grãos produzidos (PAULETTI, 2004). Nesse experimento, o tratamento ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo) com 191,6 kg ha⁻¹ de acúmulo de N e produtividade de 11,3 t ha⁻¹, tem-se um valor de 16,9 kg de N por tonelada de grãos produzidos.

Ao contrário do N, o B é acumulado mais na MSPA do que nos grãos da planta de milho.

Para o acúmulo de B não houve diferença significativa. A média do B acumulado no grão, MSPA e total foram, respectivamente: 12,2 g ha⁻¹, 86,8 g ha⁻¹ e 134,5 g ha⁻¹ (Gráfico 7).

As fontes apresentaram diferença ($p \leq 0,05$) apenas para grão em relação ao acúmulo de Cu. A média de Cu acumulado na MSPA e total foram, respectivamente: 30 g ha^{-1} e 68 g ha^{-1} (Gráfico 8).

O Cu acumulado no grão apresentou a seguinte ordem decrescente: ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) com $41,9 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B) com $40,9 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu) com $40,4 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B) com $40,2 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 3% Zn) com $39,4 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn) com $39,1 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia + PA (44,3% N; 0,15% Cu; 0,4% B) com $38,8 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia perolada (46% N) com $38,6 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo) com $38,5 \text{ g ha}^{-1}$ > ureia + 0,8% DMPP (45% N) com $35,7 \text{ g ha}^{-1}$ = ureia + PA (41,6% N) com $34,5 \text{ g ha}^{-1}$ = tratamento controle com $30,4 \text{ g ha}^{-1}$ (Gráfico 8).

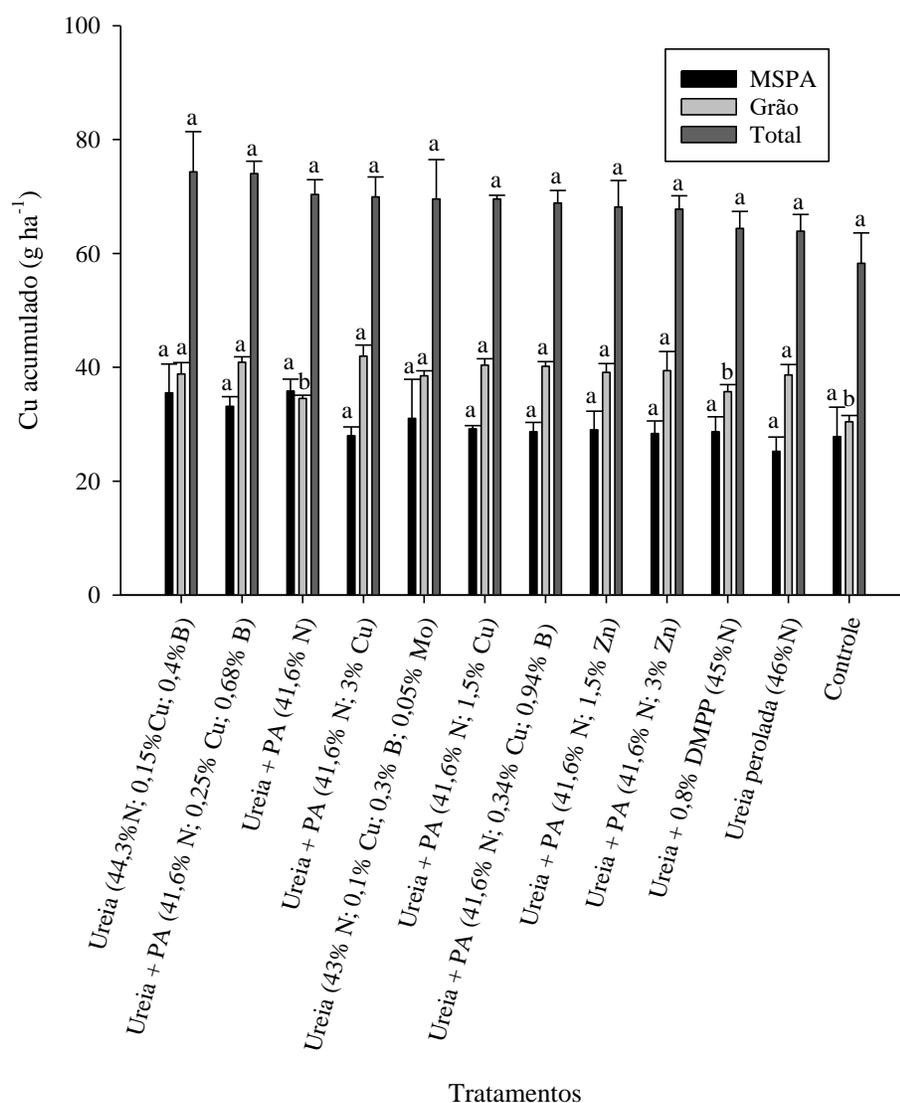


Gráfico 8 Acúmulo de cobre (g ha⁻¹) na massa seca da parte aérea (MSPA), grão e total (soma da MSPA e grão) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014

O Zn acumula-se muito mais no grão do que na MSPA, assim como ocorre com o N. A média acumulada de Zn na MSPA e total foram, respectivamente: 66,4 g ha⁻¹ e 270,5 g ha⁻¹ (Gráfico 9).

O Zn acumulado no grão apresentou a seguinte ordem decrescente: ureia + PA (41,6% N; 1,5% Cu) com 232,1 g ha⁻¹ = ureia + PA (41,6% N; 0,25% Cu; 0,68% B) com 231,6 g ha⁻¹ = ureia + PA (41,6% N; 0,34% Cu; 0,94% B) com 222,5 g ha⁻¹ = ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) com 221,9 g ha⁻¹ = ureia + PA (41,6% N; 1,5% Zn) com 220,1 g ha⁻¹ = ureia + PA (41,6% N; 3% Zn) com 217,0 g ha⁻¹ = ureia + PA (44,3% N; 0,15% Cu; 0,4% B) com 212,7 g ha⁻¹ = ureia perolada (46% N) com 211,9 g ha⁻¹ = ureia + PA (43% N; 0,1% Cu; 0,3% B; 0,05% Mo) com 204,1 g ha⁻¹ = ureia + 0,8% DMPP (45% N) com 202,0 g ha⁻¹ > ureia + PA (41,6% N) com 184,8 g ha⁻¹ = tratamento controle com 167,6 g ha⁻¹ (Gráfico 9).

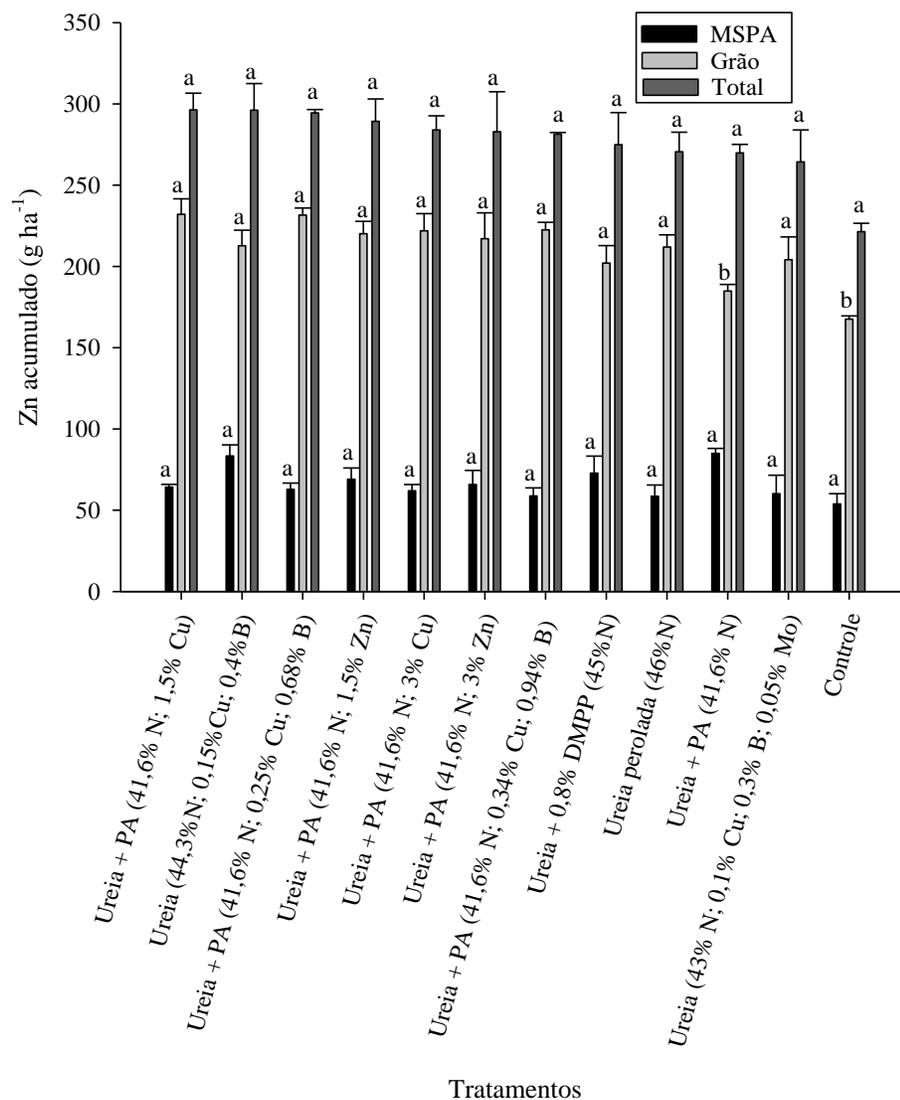


Gráfico 9 Acúmulo de zinco (g ha⁻¹) na massa seca da parte aérea (MSPA), grão e total (soma da MSPA e grão) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014

No milho, o Zn é o micronutriente mais exportado pela colheita de grãos. Em geral há exportação de 27,6 g de Zn por tonelada de grão produzido (PAULETTI, 2004). Nesse experimento tomando-se por base o tratamento ureia mais + PA (41,6% N; 1,5% Cu) com 232,1 g ha⁻¹ de Zn acumulado no grão e produtividade de 11,5 t ha⁻¹, obtém-se o valor de 20,2 g de Zn por tonelada de grão produzido.

4.5 Índices de eficiência

A EA foi influenciada significativamente ($p \leq 0,05$) pela aplicação da ureia convencional, com inibidores de urease e nitrificação (Gráfico 10). Dentre os tratamentos que apresentaram maiores valores de EA, a ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) promoveu EA de 18 kg de grãos para cada kg de N aplicado. Nesse caso foram produzidos 2.700 kg de grãos (18 kg grãos*150 kg N) a mais que o tratamento controle (9.000 kg), totalizando 11.700 kg de grãos (Gráfico 10).

A ureia + PA (41,6% N) proporcionou a menor EA, com valor de 4,4 kg de grãos para cada kg de N aplicado, ou seja, foi produzido 660 kg de grãos a mais que o tratamento controle, totalizando 9.660 kg de grãos com essa fonte (Gráfico 10).

A sequência dos tratamentos para EA (Gráfico 10) segue exatamente a mesma sequência para produtividade (Gráfico 5).

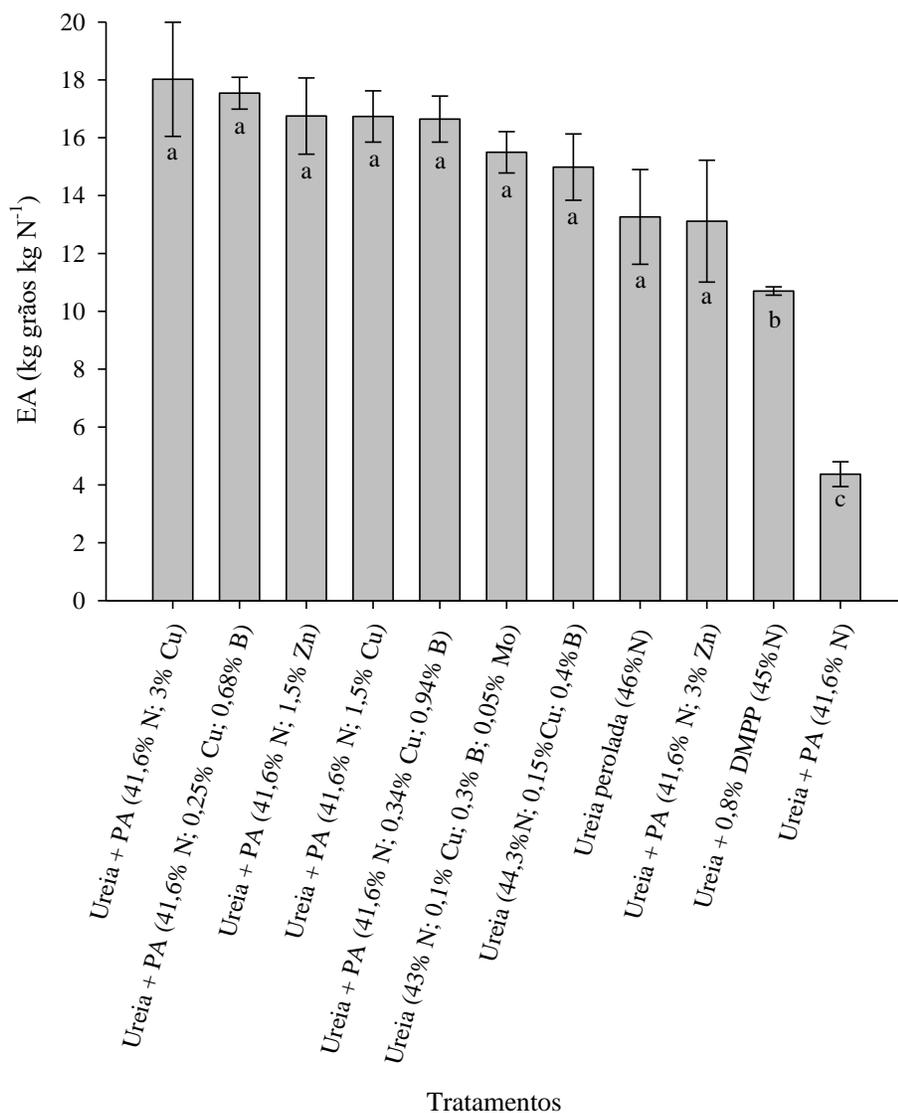


Gráfico 10 Eficiência agrônômica (EA) do milho (kg grãos kg⁻¹ de N aplicado) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014

Como a EA é o incremento de produção que o fertilizante proporciona em relação à produção sem adubação (tratamento controle), quanto maior a dose de N menor será a EA, ou seja, menor será o aproveitamento do N pela planta, por ocorrer maiores perdas do N por volatilização e lixiviação e ou a dose de N exceder a necessidade da planta.

Estudo de Farinelli et al. (2010) concluíram que entre as doses de 40 e 160 kg ha⁻¹ de N na cultura do milho sob sistema de plantio direto e convencional a EA diminuiu quando se aumentaram as doses de N em cobertura e os maiores ganhos na produtividade de grãos por kg de N aplicado foi obtido no sistema de plantio direto. Nas doses de 40 e 160 kg ha⁻¹ de N sob sistema de plantio direto a EA ficou em torno de 80 e 10 kg kg⁻¹, respectivamente.

De maneira geral a EA obtida foi baixa, ou seja, o solo apresentou baixa resposta a aplicação de N. Esse comportamento se deve ao fato da área ser cultivada com sistema de plantio direto há 20 anos, o que proporcionou um acúmulo e manutenção de matéria orgânica e nitrogênio no sistema solo. Valores de EA encontrados por Mota et al. (2015) pelo de uso do nitrogênio na cultura do milho (safra 2011/2012) foram: 42, 41, 39 e 38 kg kg⁻¹, das fontes ureia convencional, ureia com inibidor de urease, ureia com inibidor de nitrificação e nitrato de amônio, respectivamente, sendo que as fontes não apresentaram diferença entre si. Porém testando doses de 70 a 280 kg ha⁻¹ de N, esses autores encontraram valores de EA de 49 e 30 kg kg⁻¹, respectivamente.

A EAR foi influenciada significativamente ($p \leq 0,05$) pelos tratamentos utilizados (Gráfico 11).

Nove tratamentos proporcionaram EAR superior, apresentando valores de 135,8% a 98,9%, com as fontes ureia + PA (41,6% N; 3% Cu) e ureia + PA (41,6% N; 3% Zn), respectivamente. A ureia perolada (46% N) é o tratamento que apresenta EAR de 100%, ou seja, esta fonte é usada como parâmetro e referência para calcular a EAR de todas as outras fontes (Gráfico 11).

A ureia + 0,8% DMPP (45% N) proporcionou EAR intermediária em relação aos demais tratamentos, sendo 80,7%, ou seja, essa fonte apresenta uma produtividade de grãos equivalente a 80,7% da produtividade de grãos com a fonte ureia perolada (45% N), em outras palavras, a ureia + 0,8% DMPP (45% N) produziu 19,3% menos grãos em relação a produção com ureia perolada (45% N) (Gráfico 11).

A ureia + PA (41,6% N) proporcionou a menor EAR: 32,95% (Gráfico 11).

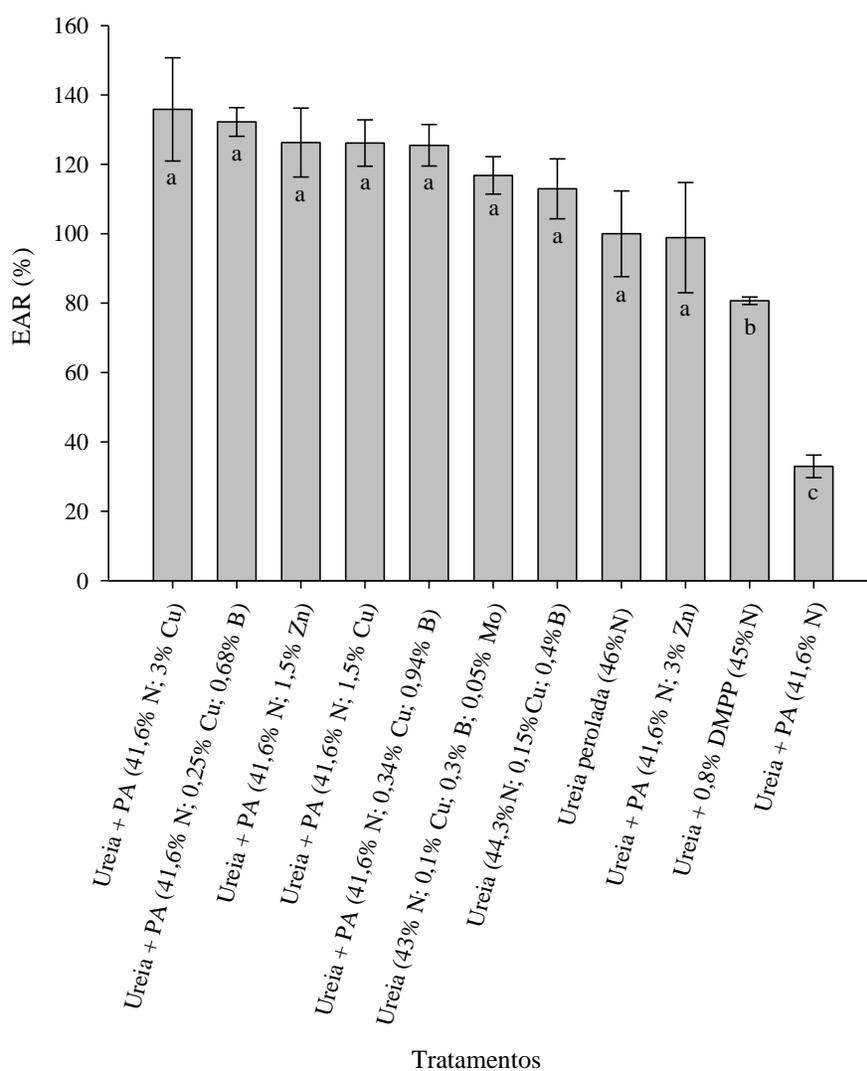


Gráfico 11 Eficiência agrônômica relativa (EAR) (%) após a aplicação da ureia convencional, com inibidores da urease e nitrificação na cultura do milho. Linhas verticais indicam o erro padrão da média. Lavras – MG, 2014

5 CONCLUSÕES

Os fertilizantes estabilizados com inibidores da urease e de nitrificação não reduzem as perdas de amônia por volatilização em comparação à ureia perolada.

A ureia com 0,8% do inibidor de nitrificação DMPP (3,4-dimetilpirazolfosfato) promoveu maior perda de nitrogênio por volatilização, menor produtividade e eficiência agronômica em comparação a ureia convencional.

O revestimento da ureia com cobre, boro e zinco não aumentou o acúmulo desses nutrientes nos grãos e na MSPA das plantas.

O uso dos fertilizantes estabilizados e revestidos com micronutrientes não promoveu aumento na produtividade e eficiência agronômica em comparação a ureia convencional.

REFERÊNCIAS

ANDA (ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS). **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2014.

BLAYLOCK, A. O futuro dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 120, p. 8-10, dez. 2007.

BENINI, S.; RYPNIEWSKI, W.R.; WILSON, K.S.; MANGANI, S.; CIURLI, S. Molecular details of urease inhibition by boric acid: insights into the catalytic mechanism. **Journal of the American Chemical Society**. v.126, n.12, p. 3714-3715. 2004.

CANCELLIER, E.L. Eficiência da ureia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solos de fertilidade construída. **Dissertação (mestrado)**. Universidade Federal de Lavras: UFLA. 75p. 2013.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. **In: Fertilidade do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG. NOVAIS, R.F.; VENEGAS, V.H.A.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTII, R.B.; NEVES, J.C.L. 2007.

CARMO, J.B.; ANDRADE, C.A.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C. Disponibilidade de nitrogênio e fluxos de N₂O a partir de solo sob pastagem após aplicação de herbicida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 29:735-746, 2005.

CHEN, Q.; QI, L.; BI, Q.; DAI, P.; SUN, D.; SUN, C.; LIU, W.; LU, L.; NI, W.; LIN, X. Comparative effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) and dicyandiamide (DCD) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in a vegetable soil. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 99:477-487. 2014.

COELHO, A.M. Nutrição e adubação do milho. **Embrapa Milho e Sorgo**. Circular técnica 78. Sete Lagoas, MG. Dez. 2006.

CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, v. 2 - Safra 2014/15, n. 12 – Décimo segundo levantamento, Brasília, set. 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_09_11_10_42_03_boletim_graos_setembro_2015.pdf>. Acesso em: 08 out. 2015.

CIVARDI, E.A.; SILVEIRA NETO, A.N.; RAGAGNIN, V.A.; GODOY, E.R.; BROD, E. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia, v. 41, n. 1, p. 52-59, jan./mar. 2011.

COSTA, A.C.S.; FERREIRA, J.C.; SEIDEL, E.P; TORMENA, C.A.; PINTRO, J.C. Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia em três solos Argilosos tratados com ureia. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 26, n. 4, p. 467-473, 2004.

COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 27:631-637, 2003.

DAWAR, K. et al. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation, **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 47, n. 2, p. 139-146, Fev. 2011.

ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; LECH, V.A.; RAMPAZZO, C. A forma de aplicação da ureia e dos resíduos vegetais afeta a disponibilidade de nitrogênio. **Ciência Rural**. Santa Maria v.35. n.2. p.360-365. Mar-abr. 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, 353p, 2013.

FANCELLI, A. L. Milho. p. 43-89. In. PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. Piracicaba, **International Plant Nutrition Institute**. 467p, 2010.

FARIA, L.A.; NASCIMENTO, C.A.C.; VITTI, G.C.; LUZ, P.H.C.; GUEDES, E.M.S. Loss of ammonia from nitrogen fertilizers applied to maize and soybean straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37:969-975, 2013.

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

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

FERREIRA, A.C.B.; ARAÚJO, G.A.A.; PEREIRA, P.R.G.; CARDOSO, A.A. Características agrônômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agricola**. v.58, n.1, p.131-138, jan. /mar. 2001.

GIRARDI, E.A.; MOURÃO FILHO, F.A.A. Emprego de fertilizantes de liberação lenta na formação de pomares de citros. **Revista Laranja, Cordeirópolis**, v.24, n.2, p.507-518, 2003.

GEISSLER, P.R.; METUCHEN; SOR, K.; LINDEN, N.J.; ROSENBLATT, T.M. Urease inhibitors. **United States Patent Office**. 1970.

GROHS, M.; MARCHESAN, N.; SANTOS, D.S.; MASSONI, P.F.S.; SARTORI, G.M.S.; FERREIRA, R.B. Resposta do arroz irrigado ao uso de inibidor de urease em plantio direto e convencional. **Ciência Agrotecnologia**. Lavras, v. 35, n. 2, p. 336-345, mar. /abr., 2011.

HÉBERT, M.; KARAM, A. & PARENT, L.E. Mineralization of nitrogen and carbon in soils amended with composted manure. **Biological Agriculture and Horticulture**. 7:349-361, 1991.

KOELLIKER, J.K.; KISSEL, D.E. Chemical equilibria affecting ammonia volatilization. In: BOCK, B.R.; KISSEL, D.E. **Ammonia volatilization from**

urea fertilizers. Muscle Shoals, National Fertilizer Development Center, p.37-52. 1988.

LADHA, J.K.; PATHAK, H.; KRUPNIK, T.J.; SIX, J.; KESSEL, C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 87, n. 05, p. 85-156, Jan. 2000.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: **POTAFOS**, 319p. 1997.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. San Diego, CA: Academic Press, 651p. 2012.

MOTA, M.R.; SANGOI, L; SCHENATTO, D.E.; GIORDANI, W.; BONIATTI, C.M.; DALL'IGNA, L. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.39, p. 512-522. 2015.

NÔMMIK, H. The effect of pellet size the ammonia loss from urea applied to forests soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 39, n. 2, p. 309–318, Oct. 1973.

PAES, M.C.D. Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. **Embrapa Milho e Sorgo**. Circular técnica 75. Sete Lagoas, MG. Dez. 2006.

PAULETTI, V. Nutrientes: Teores e interpretações. **Fundação ABC**. 2 ed. Castro 86p. 2004.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica: UFRRJ, 158p, 1998.

REYNOLDS, C.M.; WOLF, D.C.; ARMBRUSTER, J.A. Factors related to urea hydrolysis in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, n.1, p.104-108, 1985.

ROJAS, C.A.L.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WEBER, M.A.; VIEIRO, F. Volatilização de Amônia da Ureia Alterada por Sistemas de Preparo de Solo e Plantas de Cobertura Invernais no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 36:261-270, 2012.

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

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da ureia 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.

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A.; RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.4, p.687-692, jul-ago, 2003.

SCIVITTARO, W.B.; GONÇALVES D.R.N.; VALE, M.L.C.; RICORDI, V.G. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. **Ciência Rural**. Santa Maria. v.40. n.6. p.1283-1289. 2010.

SOR, K.M.; LINDEN, N.J. Fertilizer composition consisting of urea, a urease inhibitor, and a hydrocarbon binder. **United States Patent Office**. 1968.

SOR, K.M.; FANWOOD; PELISSIER, J.A.; METUCHEN, N.J.; ROSS LATHAM; ADRIAN; MICH. Urease inhibited urea-containing composition. **United States Patent Office**. 1971.

SORATTO, R.P.; PEREIRA, M.; COSTA, T.A.M.; LAMPERT, V.N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. **Revista Ciência Agronômica**. v. 41, n. 4, p. 511-518, out-dez, 2010.

SOUSA, E.R. Perdas de nitrogênio pela emissão de óxido nitroso (N₂O) e sua relação com a decomposição da serrapilheira e biomassa de raízes na floresta de Mata Atlântica. **Dissertação (mestrado)**. Universidade de São Paulo: USP. 2008.

STAFANATO, J.B.; GOULART, R.S.; ZONTA, E.; LIMA, E.; MAZUR, N.; PEREIRA, C.G.; SOUZA, H.N. Volatilização de amônia oriunda de ureia pastilhada com micronutrientes em ambiente controlado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 37:726-732, 2013.

TAKASHI, S.; ANWAR, M.R. Wheat grain yield, phosphorousuptake and soil phosphorous fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, 101(2):160-171. 2007.

TASCA, F.A.; ERNANI, P.R.; ROGERI, D.A.; GATIBONI, L.C.; CASSOL, P.C. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 493-502, abr. 2011.

TEDESCO, M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, planta e outros materiais. 2. ed. **Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS**, 174p. 1995.

TIMILSENA, Y.P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 2014.

TOMASZEWSKA, M.; JARPSOEWICZ, A.; KARAKKULSKI, K. Physical and chemical characteristics of polymer coatings in CRF formulation. **Deslination, Nottingham**, v.146, n.3, p.319-323, 2002.

TRENKEL, M. E. Slow and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. **Paris: International Fertilizer Industry Association**, p. 163, 2010.

VIEIRA, B.A.R.M.; TEIXEIRA, M.M. Adubação de liberação controlada chega como solução. **Revista Campo & Negócios**, Uberlândia, v.41, n.3, p.4-8, 2004.

ZAHRANI, S. Utilization of polyethylene and paraffin waxes as controlled delivery systems for different fertilizers. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v.39, n.3, p.367–371, 2000.