

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA
MESTRADO EM AGROECOLOGIA

USO DO INIBIDOR DE UREASE PARA AUMENTAR A
EFICIÊNCIA DO NITROGÊNIO NA CULTURA DO MILHO

ELTON GUIMARÃES RIOS MENDES

São Luís - MA
2016

ELTON GUIMARÃES RIOS MENDES

Engenheiro Agrônomo

**USO DO INIBIDOR DE UREASE PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA
DO NITROGÊNIO NA CULTURA DO MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Maranhão, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, para obtenção do título de Mestre em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Heder Braun

São Luís - MA

2016

Mendes, Elton Guimarães Rios.

Uso do inibidor de urease para aumentar a eficiência do nitrogênio na cultura do milho / Elton Guimarães Rios Mendes. – São Luís, 2016.

46 f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Agroecologia, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Heder Braun.

1.*Zea mays* L. 2.Adubação nitrogenada. 3.Uréia. 4.Inibidor. I.Título

CDU: 633.15-184

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA

Elton Guimarães Rios Mendes

**USO DO INIBIDOR DE UREASE PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DO
NITROGÊNIO NA CULTURA DO MILHO**

Aprovado em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Heder Braun (Orientador)

Prof. Dr. Altamiro Souza de Lima Ferraz Junior (UEMA)

Dr. João Batista Zonta (Embrapa Cocais)

DEDICO!

Aos meus pais Francisco Arnaldo de Sousa Mendes e Ana Silvia Guimarães Rios Mendes,
por todo amor, carinho e ensinamentos passados todos os dias.

À minha esposa Arícia, pelo amor, carinho, força e compreensão,
principalmente nas horas mais difíceis.

OFEREÇO !

AGRDECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, saúde e sabedoria, guiando-me em todos os dias de minha vida;

Aos meus pais, pelo amor, carinho e por todos os ensinamentos repassados;

À Arícia, minha esposa, que sempre me incentivou principalmente nas horas mais difíceis, sendo um alicerce em minha vida.

À Universidade Estadual do Maranhão, onde iniciei minha vida acadêmica no curso de agronomia;

Ao Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, por oportunizar em realizar este sonho em minha vida e ampliar meus conhecimentos;

Ao professor Dr. Heder Braun, pela orientação, compreensão e amizade durante esses anos de convívio, que se tornou não apenas um orientador, mas um verdadeiro amigo;

Ao Silvestre Neto e a Península Norte Fertilizantes, pela doação do fertilizante utilizado para este trabalho;

Ao Luciano Lucero e toda equipe da Eco Agro Resources, pela doação do inibidor N-yield™, que foi fundamental para o êxito deste trabalho;

Aos alunos da graduação Ester, Márcia, Erivaldo, Werlen, Karen, pelo apoio dado nas atividades de campo e em laboratório;

Ao Benjamin pela ajuda na utilização do IRGA;

A todos os colegas do mestrado em, por todos os momentos difíceis e alegres que passamos, nunca deixando-nos desanimar;

Aos funcionários Neto e Dionísio “Dió”, pela ajuda em campo;

À secretária do curso Rayanne sempre solícita e atenciosa;

A todos os funcionários do mestrado Maria, D. Carmelita, João pelo apoio prestado quando precisamos e pelos bons momentos passados;

Ao CNPq, CAPES e a FAPEMA pelo auxílio financeiro ao projeto e fomento a pesquisa.

MUITO OBRIGADO!

*“A nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos,
mas sim em levantarmo-nos sempre depois de cada queda”.*

Oliver Goldsmith

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Produtividade de grãos (A), eficiência de uso do N (B) e eficiência de absorção do N (C) em função das doses de N, aplicadas em cobertura, na cultura do milho. Barras com letras minúsculas e maiúsculas comparam as doses de N com ureia e ureia com N-yield, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). N1, N2 e N3 representam as doses de 30, 60 e 180 kg ha⁻¹ de N.29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Índice de colheita de grãos (ICG), contribuição da remobilização do N para o grão (CRNG, %) e conteúdo de N no grão por unidade de N disponível (CNGN, kg kg ⁻¹).	28
Tabela 2. Eficiência de remobilização do N (ERemN), índice de colheita de N (ICN), Remobilização da matéria seca (RMS), Eficiência de remobilização da matéria seca (ERMS), Contribuição da remobilização de matéria seca para o grão (CRMSG) e Eficiência de Utilização do N (EUtN).....	31

Sumário

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 A cultura do milho	3
2.2 Nitrogênio no sistema solo-planta	4
2.3 Perdas de N	7
2.4 Estratégias para minimizar as perdas de N no solo	8
REFERÊNCIAS	12
CAPÍTULO II.....	21
UREIA COM INIBIDOR DE UREASE PODE AUMENTAR A EFICIÊNCIA DO NITROGÊNIO NO MILHO.....	21
1. INTRODUÇÃO.....	23
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
2.1 Análises Estatísticas.....	27
3. Resultados e Discussão.....	27
3. CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS	33

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho (*Zea mays L.*) é o cereal mais produzido no mundo e exerce importante função socioeconômica para o Brasil, pois é o terceiro maior produtor, superado apenas pelos Estados Unidos da América e China. No Brasil, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), em 2015, a área plantada para a safra de 2014/2015 foi 15.481 hectares com produtividade média de 5,38 t ha⁻¹. No estado do Maranhão, conforme levantamento da CONAB, em 2015, a produtividade total foi estimada em 2,8 t ha⁻¹, alcançando o segundo lugar na região Nordeste, perdendo apenas para o estado da Bahia, com 3,5 t ha⁻¹. No entanto, a produtividade brasileira ainda é baixa e um dos fatores que contribuem para as baixas produtividades é o manejo inadequado da adubação nitrogenada. Com o intuito de reduzir as perdas de nitrogênio (N) e, conseqüentemente, aumentar a produtividade e a eficiência do uso do N, é preciso fornecer fertilizantes, de forma adequada, dentre os quais estão incluídos os fertilizantes nitrogenados.

O N é um dos nutrientes requeridos em maior quantidade pelo milho, devido fazer parte de várias moléculas, tais como proteínas, enzimas, aminoácidos, ácidos nucleicos, citocromos, etc. Além disso, apresenta função importante na fotossíntese, pois está presente na molécula de clorofila e na enzima aceptora de gás carbônico (CO₂), a ribulose 1,5 bisfosfatocarboxilase/oxigenase (Rubisco) e fosfoenolpiruvatocarboxilase (PEPcase) (TAIZ & ZEIGER, 2009). Desta forma, a adubação nitrogenada é de grande importância para obtenção de elevadas produtividades das culturas.

Dentre os fertilizantes nitrogenados, a ureia é o mais comercializado no país, isto se deve por sua elevada quantidade de N por unidade do produto (45%) na forma amídica, alta solubilidade e baixo custo de produção. A desvantagem na utilização desse fertilizante são as elevadas taxas de perdas de N que podem atingir até 80% do N aplicado (MARTHA JÚNIOR et al., 2004), tornando-o mais suscetível à volatilização, acarretando impactos negativos aos agroecossistemas como a contaminação de solos e lençóis freáticos e a diminuição da eficiência de uso do N (EUN). Essas perdas são agravadas nas condições do trópico úmido maranhense, no qual encontramos solos altamente intemperizados com baixa retenção de cátions e pluviosidade acima de 2000 mm (MOURA et al., 2008).

Nos últimos anos o mercado tem lançado diversos produtos que visam minimizar essas perdas, como os fertilizantes de liberação lenta, a exemplo dos fertilizantes encapsulados ou revestidos por polímeros, que liberam o N gradativamente, e os fertilizantes estabilizados onde a ureia é previamente tratada com inibidores de urease e de nitrificação.

Dentre esses inibidores de urease, o NBPT ((N-(n-butil) triamidatíofosfórica), tem apresentado resultados satisfatórios na redução das perdas de N (SCIVITTARO et al., 2010; ANDRADE et al., 2014; MOTA et al., 2015). O NBPT se decompõe em seu análogo NBPTO (fosfato de N-n-butiltriamida) (CUNHA et al., 2011) quando reage com o oxigênio, dessa forma atua ocupando o local ativo da ureia no solo, desacelerando a atividade da enzima urease (CANTARELLA et al., 2007) e conseqüentemente, minimizando as perdas de N por volatilização. Além disso, o atraso na hidrólise, diminui a concentração de NH_3 na superfície do solo, reduzindo o potencial de volatilização (RAWLUK et al., 2001) e, conseqüentemente o N permanece em maior contato com as raízes e favorecendo a absorção de N. No entanto, os resultados de pesquisa ainda são contraditórios, pois nem sempre o retardamento das transformações do N do fertilizante da forma amídica ou amoniacal reflete em aumento no aproveitamento de N pelas culturas e, conseqüentemente, aumento na produtividade de grãos (ANDRADE et al., 2014; CANTARELLA et al., 2008; MARCHESAN et al., 2013; PRANDO et al., 2012; SCIVITTARO et al., 2010; SILVA et al., 2011).

Diante dessas lacunas, surgem dúvidas quanto as recomendações de doses e fontes de N devido ao seu manejo complexo em relação às condições edafoclimáticas características de cada local. Portanto, o uso dos inibidores de urease, que contem em sua formulação NBPT, como é o do produto comercial N-yield™, tem se mostrado uma estratégia de manejo eficiente, pois minimiza as perdas de N, e permite o maior aproveitamento e conseqüentemente incrementa a eficiência de uso do N (YAN; ZHENG, 2007) e, por conseguinte, o rendimento de grãos de milho (JUNIOR et al., 2011).

Dessa forma, o conhecimento da quantidade de N fornecida e a melhor fonte de N para aplicação em cobertura de modo a permitir melhor aproveitamento do N pela cultura do milho e, conseqüentemente, aumento da EUN e produtividade, para as condições do Trópico Úmido fazem se necessário. Com base na literatura especializada, para as condições de solo e clima maranhense, são escassas informações sobre o uso de inibidores de urease com intuito de aumentar a EUN e produtividade da cultura do milho.

Com base no exposto, objetivou-se utilizar doses de nitrogênio tratadas com inibidor de urease N-yield™ como estratégia para aumentar a produtividade de grãos bem como os componentes da eficiência de uso do nitrogênio pela cultura do milho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do milho

O milho (*Zea mays*L.) é uma cultura de ciclo anual, monocotiledônea, da família das *Poaceas* (Gramíneas). Acredita-se que a domesticação do milho ocorreu há 7.000 mil anos, provavelmente na América, na região centro-sul do México, de um ancestral em comum chamado Teosinte (FREITAS, 2001).

Atualmente, o milho é o cereal mais produzido no mundo, em razão de vários trabalhos de melhoramento genético, adaptando-se aos mais diversos tipo de clima, solo e altitudes, sendo cultivado tanto em regiões tropicais como temperadas. Além disso, o grão apresenta qualidade nutricional, com base no peso seco de matéria seca, 73% de amido, 10% de proteína e 4% de lipídios (MUNDSTOCK & BREDEMEIER, 2006). Com isso, torna-se grande alimento para as famílias de baixa renda, principalmente, como fonte de proteínas.

Por essa razão é empregado na alimentação humana *in natura*, ou industrializado como amido, fubá, óleo, xaropes, etc. Porém, a maior parte da produção de grãos é voltada à produção animal, principalmente para a cadeia produtiva de aves e suínos, em que é o destino de 70 a 80% da produção nacional, conforme relatado por Civardi (2011).

Os maiores produtores de milho são os EUA e China. O Brasil encontra-se como terceiro maior produtor deste cereal. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção brasileira de milho na safra 2014/2015 atingiu 84,7 milhões de toneladas, com aumento de 5,8% em relação à safra 2013/2014 (CONAB, 2015). A região centro-sul é a maior produtora de grãos do país, com produtividade média de 6,13 Mg ha⁻¹, enquanto que a região nordeste obteve apenas 2,7 t ha⁻¹. Entre os estados do nordeste, o Maranhão possui a segunda maior área de produção, com 514,3 mil hectares e ocupa a terceira posição em produtividade, 2,9 t ha⁻¹, para a safra de 2014/2015 (CONAB, 2015).

Em virtude do grande potencial produtivo, os valores de produtividade alçados pelos agricultores brasileiros ainda são baixos, quando comparados aos norte-americanos, por exemplo, com produtividades médias de 10 t ha⁻¹ (FAO, 2013).

Dentre os fatores que contribuem para esta baixa produtividade, podemos destacar a baixa fertilidade natural dos solos em regiões de clima tropical úmido, devido ao seu elevado grau de intemperização, elevado custo dos fertilizantes, principalmente para o agricultor

familiar, e ao manejo incorreto da adubação nitrogenada, que com as elevadas perdas de N, reduz, a eficiência de uso do N (EUN).

2.2 Nitrogênio no sistema solo-planta

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes mais exigidos pelas culturas agrícolas (FARINELLI & LEMOS, 2012) este fato, ligado ao aumento da demanda mundial por alimentos, energia e fibras, requer o incremento da produtividade dos plantios, tendo como consequência a elevação do consumo de fertilizantes nitrogenados.

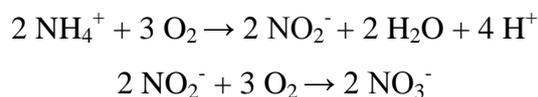
O N é afetado por uma dinâmica complexa visto que, apresenta grande variabilidade nas reações de oxirredução, e está presente em diversos estados de oxidação, conferindo-lhe grande importância nos ciclos biogeoquímicos e nos processos fisiológicos das plantas (EPSTEIN e BLOOM, 2005).

A maior parte do N presente no solo encontra-se na forma orgânica, como restos vegetais e animais e no húmus; ou na forma inorgânica como amônio (NH_4^+) ou nitrato (NO_3^-). O N pode ser absorvido pelo sistema radicular das plantas tanto como NH_4^+ ou como ânion nitrato (NO_3^-), porém, devido a presença de bactérias nitrificantes existentes no solo, grande parte do N é absorvido como nitrato (YAMADA, 1996). O N quando presente na forma orgânica, para que os vegetais possam absorvê-lo, é necessária sua conversão para a forma inorgânica. O processo de transformação de N orgânico em NO_3^- é denominado de mineralização.

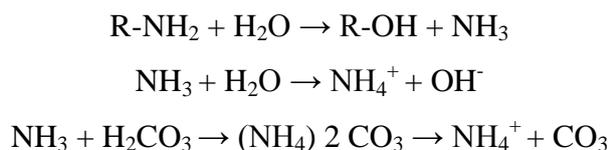
A mineralização é a transformação do N orgânico, que está fazendo parte da estrutura dos materiais de origem animal ou vegetal, para a forma mineral ou inorgânica. Essa reação é efetuada por microrganismos quimioautotróficos, e ocorre em duas etapas (desaminação e amonificação), sendo influenciadas por fatores climáticos como temperatura e umidade do ar, o pH e a textura do solo. A transformação do N orgânico em mineral é extremamente importante para a sua disponibilidade aos vegetais, pois aproximadamente 98% do N total do solo se encontram na forma orgânica, o qual tem que ser mineralizado para ser absorvido pelas plantas (ALFAIA et al., 2006).

Logo após a mineralização e formação do NH_4^+ , ocorre o processo de nitrificação que é a transformação do amônio (NH_4^+) em NO_3^- . Esta reação ocorre devido à ação de bactérias dos gêneros *Nitrossomonas* e *Nitrobacter*, também denominadas como bactérias nitrificadoras. A nitrificação segue duas etapas: inicialmente, as bactérias do gênero *Nitrossomonas* convertem o cátion NH_4^+ em nitrito (NO_2^-). Em seguida, o gênero *Nitrobacter*

reduzem o NO_2^- a NO_3^- . Esta última forma de N pode ser facilmente perdida do sistema solo, uma vez que a maioria dos solos normalmente possui carga líquida negativa, o que dificulta a adsorção eletrostática de ânions, tornando-os suscetíveis à lixiviação pela água que percola através do perfil do solo. A reação global da nitrificação pode ser assim representada (METCALF & EDDY, 2003):



O N também pode ser convertido em amônia (NH_3) através do processo de amonificação. Esta reação ocorre porque o N é transformado pelos organismos amonificadores na forma de amônia produzindo simultaneamente grande quantidade de ânions orgânicos. Por causa da reação entre a amônia e a água, o NH_3 passa para a forma amoniacal (NH_4^+), liberando no ambiente íons hidroxila (OH^-) que reagem com o hidrogênio (H^+) da solução do solo aumentando o pH. Abaixo seguem as reações básicas da amonificação (VAN HAANDEL & MARAIS, 1999):



Portanto, o N encontra-se no solo disponível nas formas nítrica (N-NO_3^-) e amoniacal (N-NH_4^+) (ARAÚJO et al., 2012), sendo estas formas absorvidas e pelas raízes e transportados até as folhas e raízes (REICHARDT & TIMM, 2004).

A maioria dos fertilizantes nitrogenados empregados na cultura milho são hidrossolúveis, e rapidamente liberam para o solo NO_3^- e NH_4^+ , sendo desta forma prontamente assimiláveis pela planta, no entanto, por sua alta mobilidade o N está susceptível a perdas, e podendo ocasionar riscos ambientais.

Na maioria dos solos de regiões tropicais, NO_3^- é a forma de N predominantemente encontrada. A absorção do NO_3^- é controlada via sistema eletrogênico-transportador de prótons (H^+ -ATPase). Na presença de NO_3^- , a membrana plasmática é despolarizada e uma bomba H^+ -ATPase bombeia prótons para o exterior da célula, gerando gradientes eletroquímicos (COLODETE, 2013). Estes gradientes criam condições para que um grupo de proteínas específicas, chamadas de “transportadores”, levem o NO_3^- presente na solução do solo para o interior das células. Para cada NO_3^- absorvido, dois prótons são cotransportados para o interior da célula (DUBY; BOUTRY, 2009)

O NO_3^- , ao ser assimilado, pode ser reduzido ou armazenado nos vacúolos das células das raízes, quando a concentração externa é baixa, à medida que há aumento do suprimento de NO_3^- este é translocado para a parte aérea via xilema, onde pode ser reduzido ou acumulado nos vacúolos foliares (TAIZ & ZEIGER, 2009).

Na planta, a conversão de NO_3^- em NH_4^+ ocorre em duas etapas, por meio de uma redução que requer oito elétrons. Primeiro ocorre redução do NO_3^- a NO_2^- no citosol, em que há transferência de dois elétrons a partir das coenzimas NADPH ou NADH, que é catalisada pela enzima nitrato redutase (NR). Em seguida o NO_2^- é reduzido a NH_4^+ , nos cloroplastos das folhas ou nos plastídeos das raízes, pela ação da nitrito redutase (NiR) (CAMPBELL, 1999). A assimilação do NO_3^- é um importante processo biológico, por ser a principal via pela qual o N inorgânico é incorporado em compostos orgânicos (FALCÃO, 2006).

Devido a sua elevada toxicidade, grande parte do amônio NH_4^+ assimilado ou reduzido deve ser convertido em compostos orgânicos como aminoácidos. São relatados diversos efeitos negativos pelo acúmulo do íon NH_4^+ sobre o crescimento, devido a necessidade de utilização dos carboidratos oriundos da fotossíntese, prioritariamente, para a rápida assimilação do amônio absorvido, com intuito de evitar sua acumulação nos tecidos e consequentes problemas de toxicidade relacionados a alterações no pH celular e desequilíbrio iônico e hormonal, entre outros (BRITTO & KRONZUCKER, 2002).

A conversão do amônio em moléculas orgânicas ocorre preferencialmente pelas enzimas Glutamina sintetase (GS) e Glutamato sintase (GOGAT). A GS combina com o íon NH_4^+ formando a glutamina, com gasto de 1 mol de ATP. Quando os níveis de glutamina estão elevados, a GOGAT é estimulada nos plastídeos, transferindo o grupo amida da glutamina para o 2-oxoglutarato, originando glutamato. Para esta reação, há transferência de elétrons, em que NADH ou a Ferridoxina (Fd) quando estas ocorrem nos plastídeos das raízes ou nos cloroplastos respectivamente. Após assimilação do amônio, em glutamina e/ou glutamato, esses são transformados em aminoácidos por reações de transaminação, mediadas por enzimas chamadas de aminotransferases (LI, et al., 2013).

Portanto, conhecer os processos de assimilação e transformação do N no sistema solo-planta, torna-se primordial para o manejo correto da adubação nitrogenada e consequentemente para aumentar a eficiência de uso do N (EUN).

2.3 Perdas de N

O N é essencial para obtenção de elevadas produtividades na cultura do milho, devido: aumentar o índice de área foliar, a assimilação fotossintética de CO₂ bem como os fotoassimilados para os órgãos drenos (HAWKESFORD, 2012). No entanto, este elemento fornecido em excesso para as culturas pode provocar perdas e gerar danos ambientais.

Em função das transformações do N no sistema solo-planta-atmosfera, apenas parte do N proveniente do fertilizante é absorvido pelas plantas e o restante é perdido para o ambiente (lençol freático ou atmosfera). O N aplicado no solo em excesso está sujeito a perdas por lixiviação, escoamento superficial, desnitrificação, volatilização da amônia, imobilização da biomassa microbiana e emissão de óxido nitroso (ALVA et al., 2006). Resultados obtidos sob os mais diversos sistemas agrícolas mostraram que raramente uma cultura aproveita mais de 60% do N aplicado como fertilizante (REICHARDT et al., 2009). A absorção de N pelas culturas é muito variável, sendo altamente dependente da espécie e variedade cultivada, idade da cultura no momento da colheita, da produção, do teor de N assimilável no solo, entre outros fatores (MELLO et al., 1989). Estas perdas podem ocorrer de várias formas:

a) **Lixiviação:** devido à predominância das cargas negativas na camada superficial do solo e a baixa interação química do NO₃⁻ com os minerais de argila, fazem com que esse ânion esteja sujeito a perdas por lixiviação, acompanhando o movimento descendente da água no perfil do solo (CANTARELLA & MARCELINO, 2008).

b) **Desnitrificação:** é o fenômeno no qual o NO₃⁻ é convertido em gás nitrogênio (N₂) pela ação de bactérias desnitrificantes. No solo, além das bactérias de nitrificação existem outros tipos, como as *Pseudomonas denitrificans*. Esse processo ocorre primordialmente em condições anaeróbias totais (solos inundados) ou parciais (sítios anaeróbios em um solo predominantemente aeróbio) (CANTARELLA, 2007).

c) **Volatilização:** o íon amônio (NH₄⁺) predomina em condições de pH ácido e a forma gasosa, NH₃, em condições de pH alcalino. A ureia quando hidrolisada na superfície dos solos gera NH₃ e CO₂. As perdas, que podem chegar a 60%, dependem das condições ambientais (umidade, características do solo) e são maiores em sistemas manejados com resíduos na superfície do solo, principalmente em sistema plantio direto, pois a atividade da urease é maior na presença de plantas e resíduos vegetais do que em solo descoberto (MARCELINO, 2009).

Após a aplicação ao solo, a uréia é hidrolisada pela enzima urease, formando o carbonato de amônio (1º reação), o qual decompõem-se rapidamente formando amônio, bicarbonato e uma hidroxila (2º reação), segundo as reações:



A hidrólise da ureia é diretamente proporcional à presença e atividade da urease, e quanto mais intensa for, maior o potencial de volatilização da amônia. A quantidade de N volatilizada após a aplicação superficial de ureia ao solo é muito variável e depende de inúmeros fatores, incluindo condições climáticas e atributos relacionados com o solo (TASCA et al., 2011), conteúdo de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (SANGOI et al., 2003) e umidade no solo (LIU et al., 2007), assim como doses de N aplicado (MA et al., 2010), temperatura (CLAY et al., 1990), valor do pH do solo (SENGIK et al., 2001) e presença de cobertura vegetal (ROCHETTE et al., 2009), interferem na quantidade de NH_3 volatilizado a partir da aplicação de ureia sobre a superfície do solo.

A aplicação de ureia quando em solo seco perde menos NH_3 , pois o processo de hidrólise enzimática da molécula de ureia não inicia, porém, um pequeno volume de precipitação ou mesmo o orvalho noturno pode desencadear essa reação (VIERO, 2011). A chuva pode transportar a ureia e o N amoniacal para camadas mais profundas do solo, aumentando a adsorção e diminuindo as perdas por volatilização. Segundo Kissel et al. (2004) em um solo franco-arenoso, 10 a 20 mm de chuva são considerados suficientes para incorporar a ureia e reduzir ou mesmo eliminar as perdas de NH_3 em áreas de solo descoberto, além disto, esta precipitação deve ocorrer dentro de 1 a 3 dias para ser efetiva. A volatilização da amônia é beneficiada pela maior atividade da urease, geralmente observada na camada superficial de solos em plantio direto (PD) (BARRETO & WESTERMAN, 1989), e pela presença da palhada a qual atua como uma barreira entre fertilizante e o solo (KELLER & MENGEL, 1986).

2.4 Estratégias para minimizar as perdas de N no solo

O N por ser um elemento dinâmico no solo e apresentar manejo complexo, 50% do fertilizante nitrogenado aplicado é aproveitado pela cultura, em virtude das perdas deste elemento no sistema solo-planta-atmosfera, principalmente devido à volatilização da amônia, conforme relata Lara Cabezas et al. (2007). Alterações de manejo e tecnologias aplicadas em fertilizantes são algumas estratégias utilizadas para reduzir estas perdas e aumentar a

eficiência de uso tendo, por conseguinte, o aumento de produtividade das culturas e a redução dos impactos ambientais gerados pelas perdas de N.

A incorporação do fertilizante nitrogenado ao solo tem sido uma prática eficiente na redução das perdas de N por volatilização (ROCHETE et al., 2009). Esta diminuição ocorre devido ao aumento do contato do fertilizante (ureia, por exemplo) com o solo, promovendo a adsorção do NH_4^+ às cargas negativas existentes na solução do solo (citar a fonte). Em experimento realizado no Sul do Paraná com a cultura do milho, Fontoura e Bayer, (2010) observaram redução das perdas acumuladas de N de 22,8% para 2% utilizando-se a ureia como fonte de N incorporada ao solo. Civardi et al. (2011), estudaram o efeito da ureia comum incorporada e a ureia revestida por polímeros aplicada superficialmente em solos de Cerrado, esses autores verificaram rendimentos de grãos 26% superior da ureia comum incorporada em relação a ureia revestida com polímeros aplicada superficialmente.

Outra estratégia de manejo é aliar dose de N e épocas de aplicação de N para aquisição de máxima eficiência produtiva e econômica, pois, a sincronização entre esses fatores favorece o maior aproveitamento do nutriente (FARINELLI & LEMOS, 2012). A quantidade média de N aplicado em cultivos comerciais de milho é de 60 kg ha^{-1} , no entanto, as recomendações técnicas para elevadas produtividades variam de 60 a 100 kg ha^{-1} (SANTOS et al., 2013) em cobertura para cultivos de sequeiro e 120 a 160 kg ha^{-1} em condições irrigadas (PAVINATO et al., 2008).

De maneira geral, o que tem sido feito em condições de campo, é a aplicação, de no máximo, 50 kg ha^{-1} de N na semeadura e em cobertura de até 200 kg ha^{-1} de N, geralmente parceladas em duas ou três aplicações entre os estágios V4 a V8 (ANDRADE et al., 2014). Contudo, as doses e épocas de aplicação divergem em virtude das condições edafoclimáticas para cada região, conforme resultados obtidos por vários autores (DUETE et al., 2008; SILVA et al., 2011; BERNARDES et al., 2014).

Em trabalho realizado por Mota et al. (2015), foi verificado aumento linear em resposta a elevação da adubação nitrogenada em cobertura com acréscimo no rendimento de grão de 8.000 kg ha^{-1} da dose zero em relação a dose máxima com 280 kg ha^{-1} . Resultados semelhantes foram obtidos por Andrade et al. (2014) e Soratto et al. (2011).

Quanto aos fertilizantes nitrogenados, às formas amídicas como a ureia possuem maior potencial de perdas e menor eficiência de uso do N. A ureia ao ser aplicada, sofre rápida hidrólise a partir da enzima urease, produzida por microorganismos presentes no solo bactérias e actinomicetos. No decorrer deste processo, há formação de carbonato de amônio $[(\text{NH}_4^+) \text{CO}_2]$ que é muito instável e em seguida é decomposto em amônia (NH_3^+), CO_2 e

água. Logo, a amônia, por ser um gás, é perdida rapidamente para atmosfera, constituindo um gás de efeito estufa (GEE) (MORAIS, 2015). Essas emissões além do risco ambiental reduz a eficiência de uso do nutriente, reduzindo a produtividade das culturas.

Para minimizar estas perdas, a indústria lançou diversos produtos como os inibidores de nitrificação, no qual são compostos que foram desenvolvidos com o objetivo de diminuir a formação de NO_3^- no solo, fazendo com que o N na forma amoniacal, que é menos suscetível à lixiviação, fique preservado por mais tempo no solo (TRENKEL, 2010).

Estes compostos atuam na primeira etapa da nitrificação, intervindo na atividade das bactérias do gênero *Nitrosomonas*, retardando a oxidação do NH_4^+ a NO_2^- por determinado período de tempo. Dessa forma, a reação completa não ocorre, pois faltaria NO_2^- para se oxidar a NO_3^- (TRENKEL, 2010).

Existem diversos produtos com potencial de inibir a nitrificação, dentre eles, os mais efetivos e com boa aceitação no mercado estão nitrapirina (NI) e dicianodiamida (DCD) (FRYE, 2005). Mais recente foi desenvolvido o composto, 3,4-dimetilpirazole-fosfato (DMPP), que vem apresentando bons resultados, além de proporcionar incrementos na produção e qualidade de várias culturas agrícolas (LANA et al., 2008; LANGE, et al., 2014; SORATTO et al., 2010). No entanto, estes inibidores possuem a desvantagem de serem muito voláteis como no caso da nitrapirina, e suscetíveis a lixiviação no DCD (MARCELINO, 2009).

Dentre os mais promissores produtos visando mitigar as perdas de N, estão os fertilizantes de liberação lenta ou controlada (CANCELLIER, 2013). Estes produtos retardam o efeito da hidrólise, aumentando a permanência da ureia no solo, desta forma, reduz as perdas por volatilização e aumenta a eficiência de uso do fertilizante (TRENKEL, 2010).

São diversos inibidores de urease existentes no mercado, esses são divididos em três grupos (CANCELLIER, 2013): o 1º grupo é constituído pelos íons metálicos Ag^+ , Hg^+ e Cu^{2+} , que bloqueiam o sítio ativo da enzima ao reagir com um grupo sulfidril da urease; o 2º grupo é constituído por compostos análogos a uréia, que inibem por competição devido ao fato de serem fontes similares, porém, estes perdem sua eficiência quando doses mais elevadas de ureia são aplicadas; e o 3º grupo que são os produtos que possuem o níquel reagindo com a urease.

Neste 2º grupo, incluem-se o NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida) que é um dos inibidores de uréase mais promissores do mercado. Quando aplicado no solo, o NBPT se decompõe rapidamente ao seu análogo de oxigênio, o NBPTO (N-(n-butil) fosfórico triamida), que desta forma inibe a ação da urease (MCCARTY et al., 1989). O NBPT ao se

decompor em NBPTO há uma substituição das moléculas de água próximas ao sítio ativo da ureíase ligando-se aos átomos de níquel.

No mercado já existem formulações com 20 a 25% de NBPT (ESPINDULA, 2010) nos quais são misturados a ureia nas proporções de 500 a 1000 mg kg⁻¹ de NBPT na ureia, sendo que a média usada no Brasil são de 530 mg kg⁻¹ (CANTARELLA, 2007).

A máxima ação do NBPT acontece na primeira semana após a aplicação da ureia, justamente quando há o pico de volatilização de 3 a 4 dias após aplicação. Porém a otimização do NBPT varia de acordo com as condições edafoclimáticas, segundo Tasca et al., (2011), em condições tropicais, relata-se que o NBPT retardou a volatilização da ureia por dois dias após a aplicação. Portanto, existem diversos trabalhos na literatura mostrando efeitos divergentes quanto ao uso NBPT em relação ao rendimento de grãos e quanto à eficiência de fontes nitrogenadas.

Resultados expressivos foram obtidos por Frazão et al. (2014) para o rendimento de grãos na cultura do milho, em que a ureia com inibidor foi significativamente superior a ureia comum, resultados semelhantes foram encontrados por Garcia et al. (2010) na cultura do café e Silva et al. (2011) na cultura do milho.

Porém, resultados contrastantes a estes foram encontrados por Mota et al. (2015), esses autores relataram não haver efeito significativo entre as fontes nitrato de amônio, ureia comum, ureia com inibidor de urease e ureia com inibidor de nitrificação sobre a produtividade de grãos de milho. Respostas semelhantes em relação ao uso do inibidor foram verificados por Grohs et al. (2011) e Espindula et al. (2013) com a cultura do trigo.

REFERÊNCIAS

- ALFAIA, S. S. Caracterização e distribuição das formas do nitrogênio orgânico em três solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 36: 135-140, 2006.
- ALVA, A.K.; PARAMASIVAM, S.; FARES, A.; DELGADO, J.A.; MATTOS Jr., D.; SAJWAN, K. Nitrogen and irrigation management practices to improve nitrogen uptake efficiency and minimize leaching losses. **Journal of Crop Improvement**, v. 15: 369-420, 2006.
- ANDRADE, F. R.; PETTER, F. A.; NÓBREGA, J. C. A.; PACHECO, L. P.; ZUFFO, A.M. Desempenho agrônômico do milho a doses e épocas de aplicação de nitrogênio no Cerrado piauiense. **Revista Ciências Agrárias**, v. 57, n. 4, p. 358-366, 2014.
- ARAÚJO, J. L.; FAQUIN, V.; VIEIRA, N. M. B.; OLIVEIRA de, M. V. C.; SOARES, A. A.; RODRIGUES, C. R.; MESQUITA, A. C. Crescimento e produção do arroz sob diferentes proporções de nitrato e de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 921-930, 2012.
- BARRETO, H. J.; WESTERMAN, R. L. Soil urease activity in winter wheat residue management systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.1455-1458, 1989.
- BERNARDES, T. G.; SILVEIRA, P. M.; MESQUITA, M. A. M.; CUNHA, P. C. R. Resposta do feijoeiro de outono-inverno a fontes e doses de nitrogênio em cobertura. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.30, p. 458-468, 2014.
- BRASIL. Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). NO357, 2005. **Diário Oficial da União**. 18/03/2005.
- BRAUN, H. Qualidade pós-colheita de tubérculos de cultivares de batata influenciada por doses de nitrogênio. **Dissertação** (Mestrado), Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2007, 98 p.
- BRITTO, D.T.; KRONZUCKER, H.J. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.159, p.567-584, 2002.
- CABRAL, N. M. T. Teores de nitrato NO_3^- e amônio NH_4^+ nas águas do aquífero barreiras, nos bairros do reduto, Nazaré e Umarizal – Belém, PA. **Química Nova**, Vol. 30, 1804-1808, 2007.

CAMPBELL, W. H. Nitrate reductase structure, function and regulation: bridging the gap between biochemistry and physiology. **Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v.50, p.277–303, 1999.

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

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

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375–470.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIM, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 397–401, 2008.

CIVARDI, E. A.; NETO, A.N. da S.; 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, 2011.

CLAY, D.E.; MALZER, G.L. & ANDERSON, J.L. Ammonia volatilization from urea as influenced by soil temperature, soil water content, and nitrification and hydrolysis inhibitors. **Soil Science Society American Journal**, v.54: 263-266, 1990.

COELHO, F. S.; FONTES, P. C. R.; PUIATTI, M.; NEVES, J. C. L.; SILVA, M. C. de C. Dose de nitrogênio associada à produtividade de batata e índices do estado de nitrogênio na folha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34: 1175-1183, 2010.

COLODETE, C.M. Fluxo molecular e iônico das proteínas de transporte em membranas. **Perspectivas online: Biológicas & saúde**, v.11: 43-52, 2013.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 2 – Safra 2014/2015, n. 12 – Décimo segundo levantamento, setembro de 2015. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_09_11_10_42_03_boletim_graos_setembro_2015.pdf>. Acesso em: 26 de setembro de 2015.

CUNHA, P. C. R.; SILVEIRA, P. M.; XIMENES, P. A.; SOUZA, R. F.; NASCIMENTO, J. L. do. Fontes, formas de aplicação e doses de nitrogênio em feijoeiro irrigado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 80-86, 2011.

DUBY G, BOUTRY M. The plant plasma membrane proton pump AT- Pase: a highly regulated P-type ATPase with multiple physiological roles. **Pflugers Arch** v.457: 645 – 655, 2009.

DUETE, R. B. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; TRIVELIN, P. C. O.; AMBROSANO, E. J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (¹⁵n) pelo milho em latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32: 161-171, 2008.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspective**. 2ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400p.

ERNANI, P.R. **Disponibilidade de nitrogênio e adubação nitrogenada para macieira**. Lages: Grafel, 76p, 2003.

ESPÍDULA, M. C. Inibidor de urease (nbpt) e a eficiência da uréia na fertilização do trigo irrigado. **Tese** (Doutorado), Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2010, 70p.

ESPÍDULA, M. C.; ROCHA, V. S.; SOUZA, M. A. de.; CAMPANHARO, M.; PAULA, G. S. Rates of urea with or without urease inhibitor for top dressing wheat. **Chilean journal of agricultural research**, 73(2) 2013.

FALCÃO, V.R. Aspectos moleculares de nitrato redutase da macroalga marinha *Gracilaria tenuistipitata* (RHODOPHYTA): sequenciamento do gene e estudo da expressão do RNA mensageiro. 2006. 132f. **Tese** (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Química, Universidade de São Paulo, SP.

FARINELLI, R.; LEMOS, L.B. Nitrogênio em cobertura na cultura do milho em preparo convencional e plantio direto consolidados. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 1, p. 63-70, 2012.

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

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **FAOSTAT/Production/Crops**. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>>. Acesso em: 26/09/2015.

FRAZÃO, J. J.; SILVA, A. R. da.; SILVA, V. L. da.; OLIVEIRA, V. A.; CORRÊA, R. S.; Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.12, p.1262–1267, 2014.

FREITAS, F. de O. Estudo genético evolutivo de amostras modernas e arqueológicas de milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Tese** (Doutorado) Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, Piracicaba, 2001.

GARCIA, A. L. A.; PADILHA, L.; GARCIA, A. W. R.; MENDES, A. N. G.; CARVALHO, C. H. S. de. Efeito da ureia com inibidor de uréase no crescimento de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2011.

GROHS, M. et al. Resposta do arroz irrigado ao uso de inibidor de urease em plantio direto e convencional. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 336–345, 2011.

HAWKESFORD, M.J. The diversity of nitrogen use efficiency for wheat varieties and the potential for crop improvement. **Better Crops**, 96 (3): 10-12, 2012.

JÚNIOR, L. A. Z.; DALCHIAVON, F.; ZAGOTTO, R. G.; SANTOS, C. **Eficiência agrônômica do revestimento da ureia com polímero aplicada em cobertura na cultura do milho**. Resumo expandido. XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Uberlândia – MG. 2011.

KELLER, G. D.; MENGEL, D. B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers surface applied to no-till corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, n.4, p.1060-1063, 1986.

KISSEL, D. E.; CABRERA, M. L.; VAIO, N.; CRAIG, J. R.; REMA, J. A.; MORRIS, L. A. Rainfall timing and ammonia loss from urea in a loblolly pine plantation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n.5, p.1744-1750, 2004.

LANA, R. M. Q.; FARIA, M. V.; LANA, A. M. Q.; BONOTTO, I.; PEREIRA, D. M. Aplicação de fertilizantes com inibidor de nitrificação e micronutrientes, na cultura do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.7: 141-151, 2008.

LANGE, A.; CAIONE, G.; SHONINGER, E. L.; SILVA, R. G. Produtividade de milho safrinha em consórcio com capim-marandu em função de fontes e doses de nitrogênio em cobertura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.13: 35-47, 2014.

LARA CABEZAS, W.A.R.; COUTO, P.A. Imobilização de nitrogênio da ureia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:739-752, 2007.

LI, S. X.; WANG, Z. H.; STEWAR, B. A. Responses of crop plants to ammonium and nitrate N. **Advances in Agronomy**, v. 118, p. 205–397, 2013.

LIU, G.; LI, Y.; ALVA, A.K. High water regime can reduce ammonia volatilization from soils under potato production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 38:1203-1220, 2007.

LIU, Y.; WANG T.; QIN, L.; JIN, Y. Urea particle coating for controlled release by using DCPD modified sulfur. **Powder Technology**, v.183, p. 88-93, 2008.

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

MARCELINO, R. Inibidor de nitrificação em fertilizantes nitrogenados e rendimento de milho. **Dissertação** (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais), Campinas 2009.

MARCHESAN, E.; GROHS, M.; WALTER, M.; SILVA, L. S.; FORMENTINI, T. C. Agronomic performance of rice to the use of urease inhibitor in two cropping systems. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 594-603, 2013.

MARTHA JR., G. B.; CORSI, M.; TRIVELIN, P. C. O.; VILELA, L.; PINTO, T. L. F.; TEIXEIRA, G. M.; MANZONI, C. S.; BARIONI, L. G. Perda de amônia por volatilização em pastagem de capim-tanzânia adubada com uréia no verão. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, p.2240-2247, 2004.

MARTINS, C. R.; PEREIRA, P. A. P.; LOPES, W. A.; ANDRADE, J. B. Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, N° 5, 2003.

MCCARTY, G. W.; BREMNER, J. M.; CHAI, H. S. Effect of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on hydrolysis of urea by plant, microbial, and soil urease. **Biology and Fertility of Soils, Berlin**, v. 8, 123–127, 1989.

MELLO, F.de A.; F. de, BRASIL SOBRINHO, M. de O. C. DO, ARZOLLA, S., SILVEIRA, R. I., COBRA NETTO, A., KIEHL, J. de C. **Fertilidade do Solo**, Nobel, São Paulo (SP), 1989, 400p.

METCALF; EDDY. **Waste water Engineering: Treatment, disposal and reuse**. 3. ed., New York: McGraw Hill, 2003, 1335 p.

MOTA, M. R.; SANGOI, L.; SCHNENATTO, 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.39:512-522, 2015.

MOURA, E. G.; SILVA, A. J. F.; FURTADO, M. B.; AGUIAR, A. C. F. Avaliação de um sistema de cultivo em aléias em um argissolo franco-arenoso da região amazônica. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.32: 1735-1742, 2008.

MUNDSTOCK, C. M.; BREDEMEIER, C. **Qualidade de grãos de milho**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2006. 112 p.

ORLANDO FILHO, J.; HAAG, H.P.; ZAMBELLO JÚNIOR, E. **Crescimento e absorção de macronutrientes pela cana-de-açúcar, variedade CB 41-76, em função da idade, em três solos do Estado de São Paulo**. Piracicaba: Planalsucar, 1980. 128p. (Planalsucar. Boletim técnico, 2).

PASDA, G.; HAHNDEL, R.; ZERULLA, W. Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor Dmpp (3,4 – Dimethyl pyrazole Phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops. **Biology and Fertility of Soils**, v. 34:85-97, 2001.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A.; GIROTTO, E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 358-364, 2008.

PRANDO, A. M.; ZUCARELI, C.; FRONZA, C; BASSOI, M. C.; OLIVEIRA, F. A. de. Formas de ureia e doses de nitrogênio em cobertura no desempenho agrônômico de genótipos de trigo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 621-632, 2012.

RAWLUK, C. D. L.; GRANT, C. A.; RACZ, G. J. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 81, n. 2, p. 239-246, 2001.

REICHARDT, K.; SILVA, A.L.; FENILLI, T.A.B.; TIMM, L.C.; BRUNO, I.P.; VOLPE, C.A. Relação entre a adubação nitrogenada e as condições hídricas do solo para um cafezal de Piracicaba, SP. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 41-55, 2009.

REICHARDT, K; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 478p. 2004.

ROCHETTE, P.; ANGERS, D.; CHANTINI, M.H.; McDONALD, J.D.; GASSER, M.; BERTRAND, N. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands. **Nutrient Cycling Agroecosystem**, 84:71-80, 2009.

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A.; RAMPAZZO, C. em decorrência da forma de Volatilização de N-NH₃ aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, v.33, 87-692, 2003.

SANTOS, L.P.D.; AQUINO, L. A.; NUNES, P. H. M. P.; XAVIER, F. O. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, n.3, p. 270-279, 2013.

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

SENGIK, E.; KIEHL, J.C.; SILVA, M.A.G. Perdas de amônia em solo e de resíduos orgânicos autoclavados e tratados com ureia. **Acta Scientiarum**, v.23:1099-1105, 2001.

SILVA, D. R. G.; PEREIRA, A. F.; DOURADO, R. L.; SILVA, F. P. da.; ÁVILA, F. W.; FAQUIM, V.. Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT-treated urea. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35: 516–523, 2011.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; VELOSO, M.E.C.; TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio (15 N) da crotalária e do milheto pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 739-746, 2006.

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

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal**. Trad. SANTARÉM, E. R. et al., 3^o ed., Porto Alegre: Artemed, 2004, p.719.

TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CASSOL, P. C. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de uréia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:493-502, 2011.

TRENKEL, M. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture**, 2nd ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 163 p. 2010.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M.C.C.; BENETT, C.G.S.; ANDREOTTI, M. Adubação nitrogenada na cultura do milho com ureia revestida por diferentes fontes de polímeros. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 2, p. 659-670, 2014.

VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. **O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicação para projeto e operação**. Campina Grande-PB: EPGRAF, 1999, 471 p.

VIERO, F. Volatilização de amônia de fertilizantes nitrogenados aplicados nas culturas do trigo e do milho em sistema plantio direto no sul do Brasil. **Dissertação (Mestrado)** – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

YAMADA, T. Adubação nitrogenada do milho. Quanto, como e quando aplicar? **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 74, p.1-5, 1996.

YAN, D.; ZHENG, W. Release characteristics of different N forms in an uncoated slow/controlled release compound fertilizer. **Agricultural Sciences in China**, v.6, p.330-337, 2007.

CAPÍTULO II

UREIA COM INIBIDOR DE UREASE PODE AUMENTAR A EFICIÊNCIA DO NITROGÊNIO NO MILHO

RESUMO: Devido à complexa dinâmica do nitrogênio (N) nos solos arenosos do trópico úmido, estratégias para aumentar a produtividade de grãos e os componentes da eficiência do uso do N (EUN), são necessárias, para a cultura do milho. Dentre as estratégias para reduzir as perdas de N e aumentar a EUN estão incluídas o uso de inibidores de urease. Assim, nós hipotetizamos que é possível aumentar a produtividade de grãos e a EUN das plantas de milho que recebem ureia com inibidores de urease em relação aquelas plantas que recebem apenas ureia comum. Diante disso, objetivou-se avaliar o efeito do N aplicado em cobertura com ou sem o uso do inibidor de urease sobre a produtividade de grãos de milho e os componentes da EUN. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial constituído por três doses de N aplicadas em cobertura: 30, 60 e 180 kg ha⁻¹ de N e duas fontes de N: ureia comum e ureia tratada com N-yield™. O incremento das doses de N aplicadas em cobertura, independentemente da fonte de N utilizada, favorece aumento na produção de matéria seca, produtividade de grãos e redução dos componentes da EUN. O uso de ureia tratada com inibidor de urease proporciona incremento de 45% na produtividade de grãos, 100% na EUN, 75% na EAN e 11,5% na EUtN em relação a ureia comum.

Palavras-chave: *Zea mays* L; adubação nitrogenada; ureia; inibidor.

UREA WITH UREASE INHIBITOR CAN INCREASE THE NITROGEN EFFICIENCY IN MAIZE

ABSTRACT: Due to the complex dynamics of nitrogen (N) in sandy soils of the humid tropics, strategies are needed to increase grain yield and N use efficiency (NUE) components in maize crop. Strategy to reduce N losses and improve NUE is used of urease inhibitors. Our hypothesis is that possible to increase the grain yield and NUE of maize plants that receive urea with urease inhibitors when compared with those plants receive only common urea. The aimed was to evaluate the influence of application of N in top-dressing with or without the use of urease inhibitor on maize grain yield and NUE components. A field experiment was carried out in a randomized block design with four replications in a factorial scheme. Three N rates applied in topdressing in the plots: 30, 60 and 180 kg ha⁻¹ N and two N sources: common urea and urea with N-yield™. Increased N rates applied in topdressing, independent of the N source used, result in a significant increase in dry matter production, grain yield and reduce the NUE components. Urea treated with urease inhibitor increase 45% on grain yield, 100% on NUE, 75% on N uptake efficiency, and 11.5% on N utilization efficiency when compared to common urea.

Keywords: *Zea mays* L; nitrogen fertilization; urea; inhibitor.

1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é de crucial importância para o crescimento e desenvolvimento das plantas. O crescimento e desenvolvimento das plantas são afetados quando o N é utilizado em quantidades excessivas. Quando o N é aplicado em quantidades excessivas, causa lixiviação do nitrato (NO_3^-) (ROBERTSON & VITOUSEK, 2009), reduz a produtividade de grãos e a eficiência do uso do N (EUN) (HONG et al., 2007). Assim, a EUN pode ser definida pela relação entre a produtividade de grãos e a quantidade de N aplicado (XU et al., 2012). No geral, dois componentes fisiológicos contribuem para a EUN pelas plantas, que são eles: a eficiência de absorção de N (EAN), definida como a capacidade de a planta absorver N; e a eficiência de utilização de N (EUtN), definida como a capacidade de a planta usar o N para produção de grãos (GAJU et al., 2014; XU et al., 2012). Então, melhorar a EUN permite aumentar a rentabilidade dos agricultores através da redução dos custos de produção, redução da emissão dos gases do efeito estufa e da lixiviação de NO_3^- (GAJU et al., 2011).

A baixa EUN ocorre pela volatilização da amônia (NH_3^+) quando a ureia não é incorporada ao solo (TASCA et al., 2011). A volatilização da NH_3^+ é resultado das transformações químicas e microbianas geradas pela ação da enzima urease (ROCHETTE et al., 2009). A urease é uma enzima responsável pela hidrólise da ureia em carbonato de amônio, que se decompõe em amônio (NH_4^+), íons bicarbonato (HCO_3^-) e hidrogênio (H^+) (TASCA et al., 2011). O NH_4 produzido a partir da hidrólise da ureia pode ser convertido a NH_3^+ , que pode se perder para a atmosfera, bem como ser absorvido pelas plantas (ROBERTSON & VITOUSEK, 2009). Então, melhorar a EUN pelas plantas é crucial e representa desafios para os pesquisadores.

Com a baixa EUN e a elevada demanda de N pelas culturas, estratégias de manejo do N devem ser aplicadas para aumentar a EUN, a produtividade e lucratividade dos agricultores. Uma alternativa para aumentar a EUN pelas plantas é o uso de inibidores da atividade da urease. Os fertilizantes que contêm o uso de inibidores de urease permitem reduzir as perdas de N, que, normalmente, ocorrem com a utilização da ureia, fazendo com que haja uma barreira física das formas solúveis, contra a exposição do nutriente para o meio, evitando-se, assim, a atuação dos mecanismos de perdas (GAGNON et al., 2012).

Diversos pesquisadores têm trabalhado com o intuito de aumentar a EUN com o uso de ureia revestida com inibidores de urease para a cultura do trigo (ESPINDULA et al., 2013), na cultura do milho (SILVA et al., 2011; FRAZÃO et al., 2014; MOTA et al., 2015), em cana de açúcar (CANTARELLA et al., 2008), entre outras culturas. Dentre os inibidores de urease, o N-(nbutil) tiofosfórico triamida (NBPT) vem se destacando como um dos mais promissores

para a maximização do uso do N da ureia em sistemas agrícolas (KRAJEWSKA, 2009; ESPINDULA et al., 2013). No solo, o NBPT se decompõe ao seu análogo de oxigênio, o NBPTO (N-(n-butil) fosfórico triamida), em que há uma substituição das moléculas de água próximas ao sítio ativo da urease ligando-se aos átomos de níquel, desta forma inibe a ação da urease (MCCARTY et al., 1989).

Doses de N podem influenciar as características agrônômicas bem como a produtividade de grãos de milho em diferentes formas, o que demonstra que o uso de inibidores de urease ainda não é uma técnica consolidada. Diante disso, em estudo realizado por Gans et al. (2006), com dois inibidores de urease, na cultura da aveia, verificaram que os inibidores reduziram as perdas de N por volatilização de NH_3 e aumentaram o rendimento da aveia, quando comparado à ureia comum. Resultado semelhante também foi observado na cultura do milho (HALVORSON et al., 2010; GAGNON et al., 2012). Por outro lado, Gioacchini et al. (2002) não relataram efeito do uso de inibidores de urease sobre o rendimento de grãos de aveia. Assim, há necessidades de estudos sobre o uso de inibidores de urease para as condições de solo e clima do trópico úmido maranhense, para a cultura do milho. Dentre os inibidores existentes no mercado, o N-yield™ destaca-se por ser um dos mais modernos que contém em sua formulação o NBPT, em que não há efeitos danosos ao meio ambiente e a saúde humana como outros inibidores. Não há estudos com o inibidor de urease N-yield™ para as condições brasileiras.

Nós hipotetizamos que é possível aumentar a produtividade de grãos e a EUN das plantas de milho que recebem ureia com inibidor de urease quando comparada com aquelas plantas que recebem ureia comum. Diante dessa premissa, objetivou-se avaliar o efeito do N aplicado em cobertura com ou sem o uso do inibidor de urease sobre a produtividade de grãos de milho e os componentes da EUN.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de campo, durante o período de outubro de 2014 a janeiro de 2015, em São Luís/MA, situado a 2°35' S e 44°12' W, com altitude de 39 m, com irrigação suplementar. O clima conforme a classificação de Köppen é do tipo Aw, tropical quente e úmido. Durante o período experimental, a média das temperaturas diárias foi 27,5 °C e as precipitações acumuladas foram 9 mm (NUGEO, 2015).

A área experimental estava em pousio por cinco anos, com vegetação arbustiva e composta principalmente por gramíneas. Para a instalação do experimento foi realizada a limpeza da área com roçagem mecanizada e os resíduos deixados sob a superfície do solo. O

solo foi classificado como argissolo vermelho amarelo distrófico (EMBRAPA, 2013). Foi efetuada a amostragem do solo, na camada de 0-20 cm de profundidade, para caracterização química e continha textura franco arenosa, e continha pH = 4,5 (CaCl₂); matéria orgânica = 17 gdm⁻³; P = 11 mg dm⁻³; K = 0,8 mmol_c dm⁻³; Ca = 11 mmol_cdm⁻³; Mg = 10 mmol_c dm⁻³; H⁺ + Al³⁺ = 35 mmol_c dm⁻³; soma de base = 21,8 mmol_c dm⁻³; Capacidade de Troca de Cátions = 56,8 mmol_c dm⁻³; Saturação por base = 38%; areia grossa = 230 g kg⁻¹; areia fina = 630 g kg⁻¹; silte = 20 g kg⁻¹; argila = 120 g kg⁻¹ e condutividade a 25 °C = 0,07 mmhos cm⁻¹.

Antes do plantio foi aplicado herbicida glifosato na dosagem de 2 L ha⁻¹. Posteriormente, foi aplicado 1,3 t ha⁻¹ de calcário agrícola (PRNT= 91%, teor de CaO = 32% e de MgO = 15%) distribuído manualmente, a lanço e de maneira uniforme em toda a área experimental. No sulco de plantio foram aplicados 30 kg ha⁻¹ de N (ureia, 45% de N), 130 kg ha⁻¹ P₂O₅ (fosfato monoamônio, 52% de P₂O₅ + 11% de N) e 80 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio, 60% de K₂O).

O experimento foi instalado no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Em esquema fatorial, os tratamentos foram constituídos pela combinação de três níveis de N (30; 60 e 180 kg ha⁻¹ de N) aplicados em cobertura, e com duas fontes de N, a ureia comum (UC) e ureia com inibidor de urease com N-yield™ (UNy). Foi utilizada a ureia (45% de N) como fonte de N. Foi usado um tratamento sem aplicação de N em cobertura com a finalidade apenas de calcular os índices e os componentes da eficiência do uso do N. Cada parcela experimental foi constituída de quatro fileiras, espaçadas de 0,80 m entre fileiras e 0,25 m entre plantas. As duas linhas laterais e as duas plantas de cada extremidade das linhas centrais serviram como bordadura.

Foi utilizado o híbrido AG 1051, com auxílio de plantadeira manual do tipo matraca adaptada para plantio direto. Foram semeadas oito sementes por metro e aos 20 dias após a emergência (DAE) efetuou-se o desbaste das plantas de milho.

A adubação com N em cobertura (tratamentos) foi realizada quando as plantas atingiram o estágio vegetativo V5, com a quinta folha completamente desenvolvida. A ureia comum e a ureia com N-yield foram aplicadas manualmente em fila contínua, superficial a 10 cm do sulco de plantio. Em seguida, foi realizada a cobertura com solo para diminuir os efeitos da volatilização. A ureia foi misturada com o N-yield™ na proporção de 4 L por tonelada de ureia, segundo as recomendação do fabricante. Para prevenir eventual ocorrência de pragas e doenças, foi realizado o controle químico preventivo. A eliminação de plantas daninhas foi feita por capina manual. A irrigação foi realizada por aspersão, duas vezes por semana.

Foram coletadas plantas representativas, aleatoriamente, tanto na antese quanto na maturação fisiológica. Nessas fases, a parte aérea das plantas foi cortada rente ao solo, colocada em saco de papel e identificada. Na maturação fisiológica, foram selecionadas as espigas dessas plantas e colhidas. Em seguida, o teor de água dos grãos foi padronizado a 130 g kg^{-1} , para determinação da produtividade de grãos (PG, kg ha^{-1}). Posteriormente, as plantas e os grãos foram acondicionados em sacos de papel e colocados em estufa de ventilação forçada de ar a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, até atingirem massa constante. Após a secagem, determinou-se a massa da planta seca e dos grãos secos. Na matéria seca dessas amostras foi quantificado o teor de N pelo método Kjeldahl, conforme metodologia descrito por Tedesco et al. (1995). O conteúdo de N total na planta (antese e maturidade fisiológica) bem como nos grãos foi determinado pela multiplicação do teor de N em cada fração pela matéria da planta seca e dos grãos secos, respectivamente. Diante desses dados foram calculadas as seguintes variáveis:

- Índice de colheita de grãos (ICG, %), $\text{ICG} = (\text{CMSg}/\text{CMSM}) \times 100$, em que CMSg: conteúdo de matéria seca no grão (kg ha^{-1}), CMSM: conteúdo de matéria seca na maturação fisiológica (kg ha^{-1});
- Índice de colheita de N (ICN, %), $\text{ICN} = (\text{CNg}/\text{CNM}) \times 100$, em que CNg: conteúdo de N nos grãos (kg ha^{-1}), CNM: conteúdo de N na maturação fisiológica (kg ha^{-1});
- Eficiência de remobilização do N (ERemN, %), $\text{ERemN} = [(\text{CNA} - \text{CNM})/\text{CNA}] \times 100$, em que CNA e CNM são os conteúdos de N na antese e maturação fisiológica (BOGARD et al., 2010; JIAN et al., 2014);
- Eficiência do uso do N (EUN, kg kg^{-1}), $\text{EUN} = [(\text{PG}_x - \text{PG}_0)/\text{N}_x]$, em que PG_x e PG_0 =produtividade de grãos (PG , kg ha^{-1}) obtida no tratamento com N e sem N, respectivamente, N_x = dose de N (kg ha^{-1}) (URIBELARREA et al., 2007);
- Eficiência de absorção do N (EAN, kg kg^{-1}), $\text{EAN} = [(\text{CN}_x - \text{CN}_0) / \text{N}_x]$, em que CN_x e CN_0 = conteúdo de N na maturação fisiológica (kg ha^{-1}) obtida no tratamento com N e sem N, respectivamente, N_x = dose de N (kg ha^{-1}) (URIBELARREA et al., 2007);
- Eficiência de utilização do N (EUtN, kg kg^{-1}), $\text{EUtN} = [(\text{PG}_x - \text{PG}_0) - (\text{CN}_x - \text{CN}_0)]$ (URIBELARREA et al., 2007);
- Remobilização de matéria seca (RMS, kg ha^{-1}), obtida pela diferença entre o conteúdo de matéria seca na antese e o conteúdo de matéria seca na maturação fisiológica. A eficiência de RMS (ERMS, %) foi obtida pela relação entre a RMS e o conteúdo de matéria seca na antese (ARDUINI et al., 2006);
- Contribuição da remobilização da matéria seca para o grão (CRMSG, %), $\text{CRMSG} = [(\text{RMS}/\text{CMSg})] \times 100$ (ARDUINI et al., 2006);

- Contribuição da remobilização do N para o grão (CRNG, %), $CRNG = [(CNA - CNM)/CNg] \times 100$ (ARDUINI et al., 2006)
- Conteúdo de N no grão por unidade de N disponível (CNGN, $kg\ kg^{-1}$), $CNGN = CNg/N_x$ (BARBIERI et al., 2008; JIAN et al., 2014).

2.1 Análises Estatísticas

Para cada característica avaliada, procedeu-se à análise de variância (ANOVA), com o objetivo de desdobrar a soma de quadrados de tratamentos para cada fator e para a interação entre os fatores. Quando a interação entre os fatores não foi significativa, realizou-se a comparação entre as médias marginais dos níveis de N ou das fontes de N. Quando a interação entre os fatores foi significativa, para cada fonte de N, procedeu-se à comparação dos níveis de N. As médias das fontes de N foram comparadas pelo teste F, enquanto que as dos níveis de N, pelo teste de Tukey. Todas as análises estatísticas foram realizadas ao nível de significância de 5% de probabilidade. Para a execução das análises estatísticas foi utilizado o programa estatístico Sistema para Análise Estatística (SAEG, versão 9.1, 2007).

3. Resultados e Discussão

Houve interação significativa entre os fatores doses de N e fontes de N para o índice de colheita de grãos (ICG, $F_{2;15}=16,2$; $p<0,0001$), para a contribuição da remobilização de N para o grão (CRNG, $F_{2;15}=3,8$; $p<0,005$) e o conteúdo de N por unidade de N disponível (CNGN, $F_{2;15}=18,27$; $p<0,0001$) (Tabela 1). Não houve diferença significativa entre as doses de $30\ kg\ ha^{-1}$ de N e $60\ kg\ ha^{-1}$ de N para o ICG e CRNG, as quais diferiram estatisticamente da dose de $180\ kg\ ha^{-1}$ de N, quando foi utilizada a ureia comum (UC) (Tabela 1). Para essas variáveis, plantas que receberam a ureia com N-yield™ (UNy) apresentaram diferença entre os três níveis de N.

As plantas que receberam UNy apresentaram incremento de 23% no ICG ($F_{1;15}=420,7$; $p<0,0001$) em relação as plantas que receberam UC (Tabela 1). Os resultados do ICG do presente experimento estão abaixo dos obtidos por Andrade et al. (2014) e Gava et al. (2010), os quais verificaram valores de ICG na ordem de 44% e 48%, respectivamente, para a cultura do milho. No entanto, o baixo ICG está relacionado às condições ambientais, principalmente, sob estresse hídrico, fator que ocorreu durante a condução do experimento (LIANG e MACKENZIE 1994).

Tabela 1. Índice de colheita de grãos (ICG), contribuição da remobilização do N para o grão (CRNG, %) e conteúdo de N no grão por unidade de N disponível (CNGN, kg kg⁻¹).

Fontes de N	Doses de N (kg ha ⁻¹)	ICG	CRNG (%)	CNGN (kg kg ⁻¹)
UC	30	0,38 a	73,9 a	0,51 a
	60	0,36 a	71,5 a	0,35 b
	180	0,31 b	47,9 b	0,15 c
	Médias	0,35 B	64,4 B	0,34 B
UNy	30	0,47 a	120,5 a	0,78 a
	60	0,44 b	99,8 b	0,56 b
	180	0,36 c	72,3 c	0,26 c
	Médias	0,43 A	97,5 A	0,53 A

Médias seguidas de letras minúsculas, na coluna, comparam as doses de N, dentro das fontes de N, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); e as letras maiúsculas, na coluna, comparam as fontes de N, pelo teste F ($p < 0,05$).

O tratamento com UNy promoveu aumento de 51% no CRNG ($F_{1;15}=3,77$; $p < 0,05$) quando comparado com as plantas que receberam apenas UC (Tabela 1). A resposta inversamente proporcional da CRNG às doses de N ocorre pelo fato que as reservas armazenadas nas partes vegetativas antes da antese amenizam a demanda de N durante a fase de enchimento de grãos (ARDUINI et al., 2006).

Houve diferença entre os três níveis de N aplicados em adubação de cobertura sobre o CNGN, independente da fonte de N utilizada. Houve redução de 71% nas plantas que receberam UC e 67% nas plantas que receberam UNy, com o aumento na dose de 30 kg ha⁻¹ de N para 180 kg ha⁻¹ de N (Tabela 1). Os valores obtidos com o uso do inibidor de urease demonstram a sua eficiência quanto às reduções das perdas de N e, conseqüente, maior absorção deste nutriente tanto nos componentes da eficiência de uso quanto na produtividade de grãos.

Houve interação significativa entre os fatores doses de N e fontes de N para a produtividade de grãos (PG, $F_{2;15}=19,9$; $p < 0,0001$), para a eficiência de uso do N (EUN, $F_{2;15}=94,8$; $p < 0,0001$) e para a eficiência de absorção de N (EAN, $F_{2;15}=8,1$; $p < 0,005$) (Figura 1). O aumento da dose de 30 kg ha⁻¹ de N para 180 kg ha⁻¹ de N proporcionou aumento de 43% e 46% na PG e redução de 63% e 69% na EUN, para as plantas que receberam UC e UNy, respectivamente (Figura 1A e 1B). Não houve diferença significativa entre as doses de

30 kg ha⁻¹ de N e 60 kg ha⁻¹ de N para a EAN, as quais diferiram da dose de 180 kg ha⁻¹ de N, quando foi utilizada a ureia comum (Figuras 1C).

Houve incremento de 45% na PG ($F_{1;15}=1391,1; p<0,0001$) das plantas que receberam a UNy (média= 2481,0 kg ha⁻¹; $n=12$) em relação às plantas de milho que receberam apenas a UC (média=1709,2 kg ha⁻¹; $n=12$).

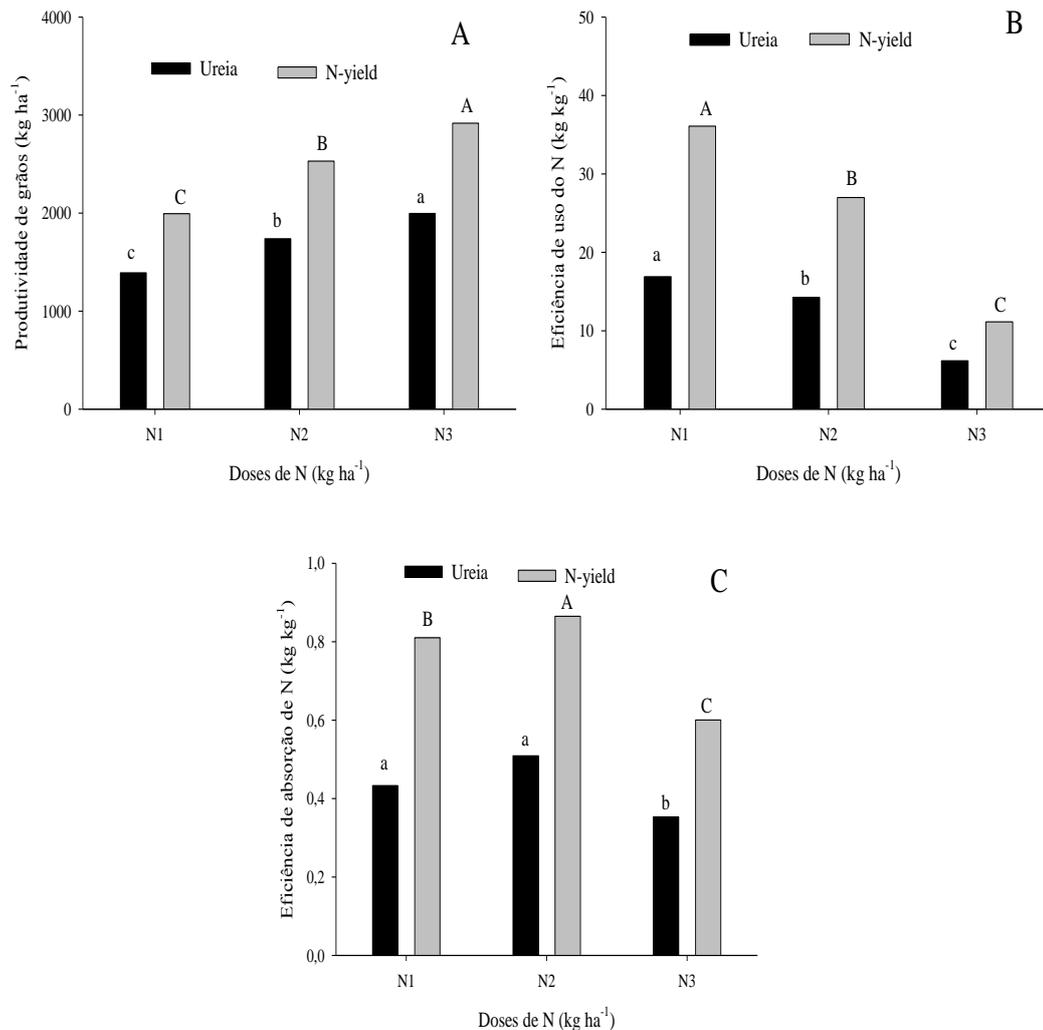


Figura 1. Produtividade de grãos (A), eficiência de uso do N (B) e eficiência de absorção do N (C) em função das doses de N, aplicadas em cobertura, na cultura do milho. Barras com letras minúsculas e maiúsculas comparam as doses de N com ureia comum e ureia com N-yield, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p<0,05$). N1, N2 e N3 representam as doses de 30, 60 e 180 kg ha⁻¹ de N.

A PG aumentou com o incremento dos níveis de N pelo fato do milho ser uma planta altamente responsiva ao N, principalmente em solos de baixa fertilidade. As plantas que receberam UNy apresentaram maior PG em comparação àquelas que receberam UC. Este fato

ocorreu possivelmente pela redução das perdas de N e, com maior tempo disponível para absorção do nutriente pelas plantas de milho. Resultado semelhante foi verificado por Silva et al. (2011) em que obtiveram maiores produtividades de grãos de milho nas plantas que receberam a ureia tratada com NBPT.

Houve incremento de 100% na EUN ($F_{1;15}=847,3$; $p<0,0001$) das plantas que receberam a UNy (média= 24,7 kg kg⁻¹; $n=12$) em relação às plantas de milho que receberam apenas a UC (média=12,4 kg kg⁻¹; $n=12$). Para a EAN, houve incremento de 75% ($F_{1;15}=533,9$; $p<0,0001$) das plantas que receberam a UNy (média= 0,75 kg kg⁻¹; $n=12$) em relação às plantas de milho que receberam apenas a UC (média=0,43 kg kg⁻¹; $n=12$).

Tanto a EUN quanto a EAN aumentaram com a redução dos níveis de N, independente da fonte de N utilizada. O uso do N-yield™ proporcionou maior EUN e EAN em relação à ureia comum (Figuras 1B e 1C). Estes resultados indicam que, em baixo nível de N, o híbrido utilizado foi eficiente em absorver o pouco N existente no solo, assim como também foi eficiente em utilizá-lo para a produção de grãos, entretanto, em níveis mais elevados, o excesso de N excedeu a necessidade da cultura (FERNANDES et al., 2005), diminuindo as eficiências de uso e absorção.

Não houve interação significativa entre os fatores doses de N e fontes de N para a eficiência de remobilização do N (ERemN, $F_{2;15}=2,48$; $p=0,1168$), o índice de colheita de N (ICN, $F_{2;15}=0,31$; $p=0,9999$), a remobilização de matéria seca (RMS, $F_{2;15}=0,38$; $p=0,9999$), a eficiência de remobilização de matéria seca (ERMS, $F_{2;15}=3,01$; $p=0,0794$), a contribuição da remobilização de matéria seca para o grão (CRMSG, $F_{2;15}=2,03$; $p=0,1660$) (Tabela 2), a eficiência de utilização do N (EUtN, $F_{2;15}=2,27$; $p=0,1372$) (Tabela 2), ficando a significância limitada aos fatores isolados.

Houve aumento de 50% na ERemN, 15% no ICN, 225% na RMS, 121% na EMRS e 101% na CRMSG nas plantas receberam o UNy em relação às plantas de milho que receberam UC (Tabela 2). Houve incremento de 3,24 kg kg⁻¹ na EUtN nas plantas receberam o N-yield, o que corresponde 11,5% em relação às plantas de milho que receberam a ureia comum. O aumento na dose de 30 kg ha⁻¹ de N para 180 kg ha⁻¹ de N proporcionou redução de 43% na ERemN, 18% no ICN, 47% na RMS, 68% na EMRS, 70% na CRMSG (Tabela 2) e 57% na EUtN (Tabela 2).

A redução da ERemN na dose de 30 kg ha⁻¹ de N para a dose de 180 kg ha⁻¹ de N, indica uma associação negativa com o acúmulo total de N na planta durante o florescimento. No milho, 45-65% do N no grão é fornecido a partir do N acumulado nas folhas e colmos

durante a fase de florescimento, sendo um processo fortemente dependente das condições ambientais e/ou do genótipo (GALLAIS e COQUE, 2005).

Tabela 2. Eficiência de remobilização do N (ERemN), índice de colheita de N (ICN), Remobilização da matéria seca (RMS), Eficiência de remobilização da matéria seca (ERMS), Contribuição da remobilização de matéria seca para o grão (CRMSG) e Eficiência de Utilização do N (EUtN)

Fontes de N	ERemN (%)	ICN	RMS (Mg ha ⁻¹)	ERMS (%)	CRMSG (%)	EUtN (kg kg ⁻¹)
UNy	38,40 A	0,39 A	1,30 A	27,70 A	66,90 A	31,49
UC	25,60 B	0,34 B	0,40 B	12,50 B	33,20 B	28,25
F _{1;15}	156,4	46,8	980,0	547,3	266,7	15,26
P-valor	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,001
Doses de N						
30	38,80 A	0,39 A	1,10 A	29,80 A	77,10 A	41,95 A
60	35,10 B	0,38 A	0,96 B	21,10 B	50,10 B	29,60 B
180	22,10 C	0,32 B	0,58 C	9,37 C	23,00 C	18,04 C
F _{2;15}	99,3	56,9	122,9	334,7	230,4	276,72
P-valor	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001	<i>p</i> <0,0001

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, para as fontes de N, não diferem entre si, pelo teste F (*p*>0,05) e para as doses de N, pelo teste de Tukey (*p*>0,05).

O ICN representa a proporção do N acumulado que é translocado para os grãos. O maior ICN (0,39) foi obtido com o menor nível de N, sendo 18% superior ao menor ICN (0,32), obtido no maior nível de N (Tabela 2). De acordo com Fageria et al. (2008), elevados valores de ICN nas culturas ou genótipos é desejável, pois há associação positiva com a PG.

A contribuição de fotoassimilados remobilizados para os grãos varia de 70 a 100% em condições de seca, e o estresse térmico pós-antese aumenta a eficiência remobilização de carboidratos não estruturais, mas diminuiu a de N (ARDUINI et al., 2006).

A EUtN representa a quantidade de grãos produzidos por unidade de N absorvido, desta forma, no presente estudo a máxima EUtN ocorreu para o nível mais baixo de N. Resultados semelhantes foram obtidos por Presterl et al. (2002), em que avaliaram 25 híbridos de milho europeus e observaram aumento na EUtN de 41% para 51% com a diminuição das doses de N.

3. CONCLUSÕES

O incremento das doses de N aplicadas em cobertura, independentemente da forma de ureia utilizada, favorece aumento na produção de matéria seca, produtividade de grãos e redução dos componentes da EUN.

O uso de ureia tratada com inibidor de uréase proporciona incremento de 45% na produtividade de grãos, 100% na EUN, 75% na EAN e 11,5% na EUtN em relação a ureia comum.

O uso do inibidor de urease mostra-se eficiente para as condições maranhenses, em que proporcionou incremento na produtividade de grãos e eficiências de N, porém, estudos dessa magnitude envolvendo aspectos financeiros são necessários para validar o seu uso.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, F. R.; PETTER, F. A.; NÓBREGA, J. C. A.; PACHECO, L. P.; ZUFFO, A.M. Desempenho agrônômico do milho a doses e épocas de aplicação de nitrogênio no Cerrado piauiense. **Revista Ciências Agrárias**, v. 57, n. 4, p. 358-366, 2014.
- ARDUINI, I.; MASONI, A.; ERCOLI, L.; MARIOTTI, M. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. **European Journal of Agronomy**, v.25, p.309-318, 2006.
- BARBIERI, P. A.; ECHEVERRÍA, H. E.; SAINZ ROSAS, H. R.; ANDRADE, F. H. Nitrogen Use Efficiency in Maize as Affected by Nitrogen Availability and Row Spacing. **Agronomy Journal**. v.100, 1094-11100, 2008.
- BOGARD, M.; ALLARD, V.; BRANCOURT-HULMEL, M.; HEUMEZ, E.; MACHET, J. M.; JEUFFROY, M. H.; GATE, P.; MARTRE, P. LE GOUIS, J. Deviation from the grain protein concentration–grain yield negative relationship is N uptake in winter wheat. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, p. 4303–4312, 2010.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIM, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugar cane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 397–401, 2008.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3º ed. Brasília, 2013. 353p.
- ESPINDULA, M. C.; ROCHA, V. S.; SOUZA, M. A. de.; CAMPANHARO, M.; PAULA, G. S. Rates of urea with or without urease inhibitor for top dressing wheat. **Chilean journal of agricultural research** v.73, 2013.
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos. Yield physiology of dry bean. **Journal of Plant Nutrition**, v.31, p.983-1004, 2008.
- FERNANDES, F. C. S.; BUZETTI, S.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. C. Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, n. 2, p. 195-204, 2005.
- FRAZÃO, J. J.; SILVA, A. R. da.; SILVA, V. L. da.; OLIVEIRA, V. A.; CORRÊA, R. S.; Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.12, p.1262–1267, 2014.

GAGNON, B.; ZIADI, N.; GRANT, C. Urea fertilizer forms affect grain corn yield and nitrogen use efficiency. *Canadian Journal of Soil Science*, v.92: 341-351, 2012.

GAJU, O.; ALLARD, V.; MARTRE, P.; GOUIS, L. J.; MOREAU, D.; BOGARD M.; HUBBART, S.; FOULKES, M.J. Nitrogen partitioning and remobilization in relation to leaf senescence, grain yield and grain nitrogen concentration in wheat cultivars. **Field Crops Research**. v.155: 213–223, 2014.

GAJU, O.; ALLARD, V.; MARTRE, P.; SNAPE, J.W.; HEUMEZ, E.; LEGOUIS, J.; MOREAU, D.; BOGARD, M.; GRIFFITHS, S.; ORFORD, S.; HUBBART, S.; FOULKES, M.J. Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes. **Field Crops Research**, v.123, p.139-152, 2011.

GALLAIS A., COQUE M. 2005. **Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency in maize: a synthesis**. *Maydica*, v.50:531-547, 2005.

GANS, W.; HERBST, F.; MERBACH, W. Nitrogen balance in the system plant-soil after urea fertilization combined with urease inhibitors. **Plant Soil Environment**, Prague, v. 52, special issue, p. 36-38, 2006.

GAVA, G. J. C. et al. Produção de fitomassa e acúmulo de nitrogênio em milho cultivado com diferentes doses de 15N-ureia. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, p. 851-862, 2010.

GIOACCHINI, P.; NASTRI A.; MARZADORI C.; GIOVANNINI C.; ANTISARI L.V.; GESSA C. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. **Biology and Fertility of Soils**, v.36: 129- 135, 2002.

HALVORSON, A. D.; DEL GROSSO S. J. and ALLUVIONE, F. Nitrogen source effects on nitrous oxide emissions from irrigated no-till corn. **Journal of Environmental Quality** v.39: 5 1554-1562, 2010.

HONG, N., P.C. SCHARF, J.G. DAVIS, N.R. KITCHEN, and K.A. SUDDUTH. Economically optimal nitrogen rate reduces soil residual nitrate. **Journal of Environmental Quality**, v.36: 354–362, 2007.

JIAN, Z.; WANG, F.; LI, Z.; CHEN, Y.; MA, X.; NIE, L.; CUI, K.; PENG, S.; LIN, Y.; SONG, H.; Li, Y.; HUANG, J. Grain yield and nitrogen use efficiency responses to N application in Bt (Cry1Ab/Ac) transgenic two-line hybrid rice. **Field Crops Research**. v.155: 184–191, 2014.

KRAJEWSKA, B. Ureasas I. Functional, catalytic and kinetic properties: A review. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, v.59: 09-21, 2009.

LIANG, B. C. & MACKIENZE, A. F. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 74, p. 235-240, 1994.

MCCARTY, G. W.; BREMNER, J. M.; CHAI, H. S. Effect of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on hydrolysis of urea by plant, microbial, and soil urease. **Biology and Fertility of Soils, Berlin**, v. 8, 123–127, 1989.

MOTA, M. R.; SANGOI, L.; SCHNENATTO, 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: 512-522, 2015.

PRESTERL, T.; GROH, S.; LANDBECK, M.; SEITZ, G.; SCHMIDT, W.; GEIGER, H. H. Nitrogen uptake and utilization efficiency of European maize hybrids developed under conditions of low and high nitrogen input. **Plant Breeding**, 121: 480-486, 2002.

ROBERTSON, G. P. & VITOUSEK, P. M. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. **Annual Review Environment and Resources** 34: 97–125. 2009.

ROCHETTE, P.; MacDONALD, J.D.; ANGERS, D.; CHANTINI, M.H.; GASSER, M. & BERTRAND, N. Banding urea increased ammonia volatilization in a dry acidic soil. **Journal of Environmental Quality**, v.38: 1383-1390, 2009.

SAEG - **Sistema para Análises Estatísticas**, Versão 9.1: Fundação Arthur Bernardes - UFV – Viçosa/MG, 2007.

SILVA, D. R. G.; PEREIRA, A. F., DOURADO, R. L.; SILVA, F. P.; ÁVILA, F. W.; FAQUIN, V. Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT-treated urea. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p. 516–523, 2011.

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 uréase. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35: 493-502, 2011.

TEDESCO, M.J. **Análise de solo, plantas e outros minerais**. UFRGS: Depto. de Solos. Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 174p, 1995.

Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, Núcleo Geoambiental – NUGEO. **Boletim Hidroclimático**. Disponível em: <<http://www.nugeo.uma.br>>. Acesso em: 30/01/2015.

URIBELARREA, M.; MOOSE, S.P.; BELOW, F.E. Divergent selection for grain protein affects nitrogen use in maize hybrids. **Field Crops Research**, v.100: 82–90, 2007.

XU, G.; FAN, X.; MILLER, A.J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. **Annual Review of Plantology**, v.63, p.153-182, 2012.