**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Eficiência agronômica da ureia revestida com polímero na adubação do
milho**

Danilo Alves Ferreira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2012**

Danilo Alves Ferreira
Engenheiro Agrônomo

Eficiência agronômica da ureia revestida com polímero na adubação do milho

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. PAULO CESAR OCHEUZE TRIVELIN

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba
2012**

Aos meus pais,

Heli Ferreira da Costa e Geralda Maria Alves Costa, pelo incentivo e apoio em todos os momentos difíceis, pelo carinho, educação, respeito e amor com que me criaram, pelo positivismo com que me ensinaram a encarar a vida. Obrigado, amo vocês.

À minha irmã,

Daiane Alves Costa, pelo amor, bondade e por me servir como exemplo de superação. Amo você.

À minha namorada,

Tatiana Mitsusaki Ricci, pelo amor e companheirismo. Te amo

DEDICO

A vida,

a qual nunca devemos deixar de dar valor e a respeitar, a qual devemos viver de maneira bondosa e com a certeza de que o amanhã a nós pertence

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e oportunidades que tem me proporcionado.

Aos meus pais e minha irmã, pela dedicação e apoio.

A todos meus familiares, primos, primas, tios e tias, e em especial meus avós pela alegria, simplicidade e carinho.

Ao professor e orientador Dr. Paulo Cesar Ocheuze Trivelin, pela valiosa orientação acadêmica dedica nos últimos anos que trabalhamos juntos, pelo profissionalismo, confiança e companheirismo a minha pessoa, a quem considero um amigo e um exemplo de profissional a ser seguido.

A professora Dra. Sônia Maria de Stefano Piedade, pela ajuda com as análises estatísticas.

A Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), em especial ao Dr. André Cesar Vitti, pela disponibilização da estação experimental onde foi desenvolvido este projeto.

Aos colegas de Pós-Graduação, pelo apoio e convívio: Carlos Eduardo Faroni, Emídio C. Oliveira, Michele X. Vieira, Eduardo Mariano, José Marcos, Oriel T. Kölln, Murilo I. M. Moraes e Evandro.

Aos amigos Henrique C. J. Franco, Rafael Otto e João Paulo Campos de Araujo, pelos ensinamentos e conselhos durante minha vida acadêmica.

Aos amigos Leonardo Silva, Rafael Silveira, Alan Bianchini, Fábio Oliveira, Rafael Loureiro, Thiago Messias, Junior Messias, Henrique Piotto, Linicius Schiavuzzo, Renan Camargo, André Marra e Rodrigo José Sorgatto por todos os anos de amizade e companheirismo.

A toda republica Pinga Pura, em especial Roberto Takafumi, Daniel Nakano, Juan Sebastian, Leandro Eiji, Rafael Tamura, Marcelo Uemura, Shizuo Hayashi, Wellington Altran, Victor Ikeda, Fabio Makoto, Raoni Ikuma, Willian Kimura, Wagner Yanaguizawa,

Eder Okamura, Rodrigo Uemura, Marcos Iguma, Mateus Macul, Gustavo Takeshi, Kang Young e Kenji Hiroshi, por todos os anos de dedicação e amizade.

Aos estagiários: Guilherme, Stefânia, Luiz Renato, Rafael, Thiago Bonassi, Lucas Miachon, Gabriela Mello e Caio Justo pelo apoio prestado durante a condução deste trabalho.

A toda equipe do Laboratório Isótopo Estável-CENA/USP: Professores José Albertino Bendassoli, Helder de Oliveira, Jefferson Mortatti; a secretária Magda; aos funcionários: José Aurélio Bonassi, Bento Moçambique, Clélber Vieira, Glauco, Juliana e Hugo Batagello pela excelência do serviço realizado.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- ESALQ/USP, ao departamento de Ciência do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição Plantas, pela infraestrutura e oportunidade concedida.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura- CENA/USP, em especial ao Laboratório de Isótopos Estáveis-LIE, pelo apoio e estrutura.

A CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante o curso de mestrado

As empresas Produquímica e COMPO, pelo financiamento deste projeto.

Aos demais colegas de Pós-Graduação: Carlos Santana e João Milagres.

A minha namorada Tatiana Mitsusaki Ricci pelo amor e companheirismo.

MUITO OBRIGADO!!!

"Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder o que, com frequência, poderíamos ganhar, por simples medo de arriscar."

William Shakespeare

"O homem nasceu para aprender, aprender tanto quanto a vida lhe permite."

Guimarães Rosa

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	12
1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Aspectos gerais e importância da cultura do milho	16
2.2 Adubação nitrogenada em milho	17
2.3 Eficiência da adubação nitrogenada.....	19
2.4 Perdas de N no sistema	20
2.4.1 Volatilização	20
2.4.2 Nitrificação e desnitrificação.....	21
2.4.3 Lixiviação.....	23
2.5 Aumento da eficiência no uso do fertilizante nitrogenado	24
2.6 Ureia revestida por polímero	26
2.7 Avaliação da eficiência do uso do N do fertilizante.....	29
2.7.1 Método direto ($\delta^{15}\text{N}$)	29
2.7.2 Métodos indiretos.....	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 Local do experimento.....	34
3.2 Características do híbrido de milho utilizado	34
3.3 Caracterização química do solo.....	34
3.4 Delineamento estatístico e tratamentos.....	34
3.5 Implantação e desenvolvimento do experimento.....	35
3.5.1 Correção do solo	35
3.5.2 Semeadura e adubação	35
3.5.3 Aplicação dos tratamentos.....	35
3.5.4 Controle fitossanitário	36
3.5.5 Temperatura e umidade.....	36
3.6 Avaliações e determinações de N-total e de $\delta^{15}\text{N}$ em plantas e solo	37
3.6.1 Parte aérea e sistema radicular.....	37
3.6.2 Solo.....	38
3.7 Cálculos	38
3.7.1 Eficiência no uso do fertilizante (Método isotópico).....	38
3.7.2 Eficiência no uso do fertilizante (Método da diferença)	39
3.8 Análise estatística	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42

4.1 Acúmulo de fitomassa pela cultura do milho em função da adubação nitrogenada.	42
4.2 Nitrogênio acumulado pelo milho em função da adubação nitrogenada	45
4.3 Nitrogênio mineral no solo (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) em função da adubação nitrogenada	51
4.4 Recuperação pelas plantas do N-ureia avaliado pela técnica de variação natural de ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$).....	54
4.5 Recuperação aparente (RA%) do N-ureia pela cultura do milho.....	59
4.6 Eficiência no uso do N-ureia pela cultura do milho.....	64
4.6.1 Eficiência fisiológica (EF)	64
4.6.2 Eficiência Agronômica (EA).....	68
5 CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS.....	73

RESUMO

Eficiência agrônômica da ureia revestida com polímero na adubação do milho

O crescimento populacional mundial das ultimas décadas, aliado a crescente preocupação da sociedade com o ambiente, tem impulsionado pesquisas em busca de novas tecnologias de produção agrícola que visem garantir elevados níveis de produtividade, visando atender a demanda mundial por alimentos, de maneira mais eficiente e menos impactante ao ambiente. Considerada essa vertente foi realizado um experimento em casa de vegetação com o objetivo de avaliar a eficiência da ureia revestida com polímero na adubação do milho. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições, no esquema fatorial, 4 fontes, 4 doses de N e 1 tratamento adicional (controle), com quatro avaliações no tempo (35, 59, 68 e 89 dias após a semeadura – DAS). As fontes de N: Ureia fertilizante convencional (UC); Ureia recoberta com polímero de lenta liberação a base de enxofre (UR1); Ureia recoberta com polímero de lenta liberação (UR2) e Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel a base de poliacrilamida (UR3) foram aplicadas aos 17 DAS. Testaram-se, também, doses de N equivalentes a 50, 100, 150 e 200 mg dm⁻³, incluindo-se um controle, sem adubação nitrogenada. Foram avaliados o teor de N e a fitomassa da parte aérea e do sistema radicular das plantas, massa de solo e o teor de N-total, $\delta^{15}\text{N}$, e também as concentrações de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ no solo. Ao final do ciclo da cultura (89 DAS), o acúmulo de fitomassa na parte aérea e planta toda de milho foram superiores nos tratamentos UR3 e UC em relação ao tratamento com o produto de lenta liberação UR1, que por sua vez não diferiu de UR2. Não houve diferença entre os tratamentos no acúmulo de fitomassa do sistema radicular. O acúmulo de N pelas plantas de milho não diferiu entre as fontes testadas. O incremento nas doses de N, para a média das fontes, promoveu efeito positivo no acúmulo do nutriente pela cultura. Os teores de N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ no solo nos tratamentos UR1 e UR2 foram comparativamente menores que UR3 e UC aos 35 DAS, e maiores nas avaliações seguintes. De maneira geral os teores de N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ aumentaram com o incremento das doses de N. A técnica isotópica de variação natural ($\delta^{15}\text{N}$) não possibilitou a estimativa do N na planta proveniente do fertilizante, por apresentar grande variação nos valores de recuperação (R%), ocasionados pelo fracionamento isotópico. A recuperação aparente (RA%) do N-ureia tanto na parte aérea como para a planta toda de milho foi maior nos tratamentos UR3 e UC aos 35 e 59 DAS, não diferindo ao final do ciclo da cultura de UR1 e UR2. Mesmo que os fertilizantes UR1 e UR2 tenham apresentado as características pretendidas de liberação mais lenta do N-ureia no início do ciclo, não houve efeito positivo no desenvolvimento da planta e na recuperação do N fertilizante quando comparado ao tratamento convencional (uréia). Por isso, mais estudos devem ser realizados a fim de verificar a viabilidade agrônômica e econômica destes fertilizantes para a cultura do milho, especialmente em condições de campo.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; Fontes de nitrogênio; Ureia; Polímeros de lenta liberação

ABSTRACT

Agronomic efficiency of polymer's coated urea in maize (*Zea mays* L.)

The world population increases in last decades and recent concerns with environmental issues encouraged the search for new agricultural production technologies, ensuring high levels of productivity with lower environmental impacts. In this context, one experiment was carried out under green house conditions, aiming to evaluate the agronomic efficiency of polymer coated urea in maize. The trial was carried out in a randomized blocks experimental design (four replicates) in a factorial including four N sources (Common urea fertilizer, *UC*; Slow-release urea 1, *UR1*; Slow-release urea 2, *UR2*; Polymer-coated urea, *UR3*) and four N rates (50, 100, 150 and 200 mg dm⁻³ of N). An additional treatment without N (control) was also evaluated. The measurements were performed in 4 periods over the crop cycle (35, 59, 68 and 89 days after sowing – DAS). The measurements included total N and shoot and root phytomass, soil and total soil N, $\delta^{15}\text{N}$, N-NH_4^+ and N-NO_3^- soil content. At the end of the cycle (89 DAS), the shoot and shoot plus root phytomass were higher for *UR3* and *UC* than for *UR1* and *UR2*. There was no difference between the N sources in root phytomass and N accumulation. In average across sources, the N rates increased the N accumulation in the plants. The inorganic N (NH_4^+ and NO_3^-) content in soil was lower for *UR1* and *UR2* at 35 DAS, increasing thereafter. Overall, increasing N rates resulted in higher inorganic soil N contents. The natural abundance method ($\delta^{15}\text{N}$) was not useful for estimating the recovery of N fertilizer from plants (R, %) due to the high variation in the values obtained by isotopic fractionation. The apparent recovery of N-urea (AR, %) by shoot and shoot plus roots were higher for *UR3* and *UC* than for *UR1* and *UR2* at 35 and 59 DAS. No difference was observed thereafter. Even though fertilizers *UR1* and *UR2* have presented the desired characteristics of slow release N-urea, there was no positive effect on plant development and N-fertilizer recovery when compared to conventional treatment (urea). Therefore, more studies should be conducted in order to verify the agronomic and economic viability of these fertilizers for the maize crop, especially under field conditions.

Keywords: *Zea mays* L.; Nitrogen sources; Urea; Slow-release polymers

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional vem gerando preocupações quanto à produção mundial de alimentos. Em projeção feita pela FAO (2009), a população mundial nos próximos 40 anos aumentará em aproximadamente 35%, chegando a 9,1 bilhões de pessoas, fazendo-se necessário um aumento de 70% na produção mundial de alimentos até 2050. A demanda por cereais, para alimentação humana e animal, é projetada para alcançar cerca de 3 bilhões de toneladas ao ano até 2050 o que significa uma aumento de aproximadamente 40% na produção atual. Visto que o desafio de produzir mais em um período em que haverá menos recursos, maior incidência de pragas, com custos mais elevados e com pressão climática e ambiental cada vez maiores devido principalmente a emissão de gases efeito estufa, 90% deste aumento na produção de alimentos deverá provir do aumento de produtividade por meio da intensificação no uso das áreas agricultáveis já exploradas, segundo comunicado da FAO (2009).

A intensificação das áreas de cultivo visando maiores produtividades deve ser alcançada por meio de forte investimento na pesquisa e desenvolvimento agrícola, principalmente na obtenção de variedades melhoradas, e no aumento da eficiência no uso de insumos agrícola pelas plantas. Dentre os insumos utilizados na agricultura, os nitrogenados destacam-se pelo seu potencial de perdas, haja vista que nenhum outro elemento essencial para nutrição de plantas apresenta um dinamismo tão grande como o nitrogênio (N) (ROBERTSON; GROFFMAN, 2007).

O aumento da eficiência no uso do fertilizante nitrogenado (EUFN) pode ser alcançado pela realização da rotação de culturas, mapeamento de solo, uso da agricultura de precisão, e práticas de manejo de fertilizantes como incorporação, diminuição das doses aplicadas, assim como a mistura de fontes nitrogenadas. O sincronismo entre a época de aplicação do insumo e o período de maior exigência de N pelas plantas, também se constitui numa importante ferramenta no aumento da EUFN, pois reduz a possibilidade de perdas de N devido a altas concentrações deste elemento no solo. Este sincronismo pode ser realizado por meio do parcelamento das doses aplicadas, ou por meio do uso de fertilizantes recobertos com polímeros.

Os fertilizantes revestidos podem ser de dois tipos: estabilizadores, e de lenta liberação ou liberação controlada (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009). Os fertilizantes estabilizadores são geralmente solúveis em água e recobertos com aditivos ou polímeros que tem a capacidade de alterar ou inibir os processos enzimáticos e microbianos do solo,

enquanto os fertilizantes de lenta liberação ou liberação controlada apresentam baixa solubilidade em água, e permitem a lenta liberação de N ao sistema, por um determinado período de tempo.

Diversos autores apontaram benefícios no uso de fertilizantes recobertos com polímero, entretanto, o uso destes insumos ainda é muito pequeno devido principalmente ao seu elevado custo de produção, sendo necessário melhor desenvolvimento de produtos que sejam agronomicamente e economicamente mais favoráveis que os insumos atualmente empregados na agricultura. Para a cultura do milho poucos são os trabalhos na literatura que demonstram os efeitos da aplicação desses fertilizantes, havendo ainda muita confusão quanto à comparação dos resultados relatados, devido à falta de padronização dos termos técnicos utilizados, referentes aos efeitos atribuídos aos mecanismos de ação dos diferentes polímeros de recobrimento.

Assim posto, este trabalho de pesquisa tem como objetivos:

- a) Avaliar os efeitos da adubação do milho com ureia revestida com polímero quanto ao acúmulo e recuperação de N pela parte aérea e sistema radicular da cultura; taxa de produção de fitomassa seca; variação nos teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- do solo;
- b) Comparar os métodos direto (isotópico) e indireto (recuperação aparente) na recuperação do N-fertilizante pela cultura do milho;
- c) Avaliar a eficiência de uso do N de diferentes fontes pela cultura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais e importância da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é um cereal da família das *Poaceas* (Gramíneas), originário da América Central, provavelmente dos planaltos do México, onde se acredita ter sido inicialmente cultivado há cerca de 7 mil anos. Este cereal apresenta ciclo anual, e é cultivado no Brasil nos períodos mais quentes e chuvosos do ano como cultura principal, ou de sucessão, como milho safrinha.

A cultura do milho é largamente cultivada em diversas regiões do mundo, e ocupa atualmente a posição de cereal mais importante em termos de produção mundial, devido principalmente ao seu uso na alimentação animal, que corresponde a 70% do consumo mundial deste cereal, embora constitua-se também como importante fonte na alimentação humana, sendo a principal fonte energética para populações de baixa renda como exemplo na região do semiárido brasileiro (Ministério da Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento - EMBRAPA, 2011).

Segundo levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento, para a safra 2010/2011, a produção mundial de milho foi de 826,07 milhões de toneladas, com consumo projetado em 829,5 milhões de toneladas. No Brasil a área cultivada foi de aproximadamente 13,1 milhões de hectares, com produção avaliada para safra 2010/2011 de 54,5 milhões de toneladas de grãos e produtividade média de $4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, o que coloca o país na posição de terceiro maior produtor mundial, sendo superado apenas por Estados Unidos e China (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2011).

O milho é uma cultura de alto potencial produtivo e altamente responsivo a insumos agrícolas como a fertilização nitrogenada, podendo apresentar altos ganhos de produtividade se manejada adequadamente (CANTARELLA; DUARTE, 2004). Em países como EUA, onde os insumos agrícolas não são fator limitante à produção, a produtividade média nacional é de aproximadamente 10 Mg ha^{-1} (United States Department of Agriculture -USDA, 2012). No entanto, no Brasil, devido principalmente ao alto valor aquisitivo dos fertilizantes nitrogenados, são empregadas quantidades insuficientes de N, que associadas à baixa fertilidade natural dos solos de clima tropical de regiões úmidas, assim como ao manejo inadequado da cultura, fazem com que o país apresente baixa produtividade média de grãos (ARAUJO; FERREIRA; CRUZ, 2004; SILVA et al., 2005).

2.2 Adubação nitrogenada em milho

O nitrogênio (N) é considerado elemento essencial para as plantas, pois está presente na composição das mais importantes biomoléculas, tais como ATP, NADH, NADPH, clorofila, proteínas e inúmeras enzimas (HARPER, 1994). Segundo Cantarella e Duarte (2004), dentre os nutrientes requeridos pelas plantas, o N é o de manejo e recomendação mais complexos, em virtude principalmente da multiplicidade de reações químicas e biológicas a que está sujeito, podendo ser absorvido pelas plantas, imobilizado por microrganismos do solo, ou perdido do sistema solo-planta. Além disso, em solos altamente férteis ou corrigidos, geralmente o N não é acumulado em formas prontamente disponíveis às plantas, podendo ser limitante aos níveis desejados de produtividade (PEREIRA et al., 2009).

Para a cultura do milho o N é requerido em grandes quantidades, sendo o nutriente que mais afeta a produção de grãos (ESCOSTEGUY; RIZZARDI; ARGENTA, 1997; LEMAIRE; GASTAL, 1997; FREIRE; VASCONCELOS; FRANCA, 2001). Este fato é evidenciado pelo consumo mundial de nutrientes em fertilizantes, sendo o consumo de P e K superado pelas quantidades utilizadas de N (MALAVOLTA, 2006). Duete (2000) afirmou que a produtividade do milho está diretamente ligada ao suprimento de N à cultura, observando respostas lineares a aplicação de ureia em doses crescentes até 175 kg ha⁻¹ de N. Araujo, Ferreira e Cruz (2004) em estudo realizado com doses de 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, também verificaram aumento na produção de grãos e parte aérea do milho com o aumento das doses, sendo que o máximo acúmulo de matéria seca pela parte aérea das plantas correspondeu a maior dose de N aplicada. Corroborando com o observado, outros autores mencionaram que a cultura do milho pode requerer doses superiores a 150 kg ha⁻¹ de N para que elevadas produtividades sejam alcançadas (REDDY; REDDY, 1993; AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; SANTINI et al., 2009).

A cultura do milho deve estar suprida com níveis adequados de nitrogênio, já que a formação de grãos está diretamente relacionada com a translocação desse nutriente e açúcares, de órgãos vegetativos para os grãos (BULL, 1993; DUETE, 2000). Lara Cabezas et al. (2000) verificaram que os grãos são responsáveis pela exportação de 51,8% do total de N absorvido pelas plantas de milho. No mesmo sentido, foi observado por Gava et al. (2006) que do total de N acumulado pela cultura, 73% encontravam-se nos grãos, enquanto 27% se encontravam nos demais compartimentos da planta, evidenciando que os grãos representam o maior dreno da planta, e que boa parte do N presente nos órgãos vegetativos é translocado para este compartimento. São ainda encontrados na literatura, trabalhos de diversos autores que

correlacionaram positivamente a produção de grãos e adubação nitrogenada (ULLOA; LIBARDI; REICHARDT, 1982; COELHO, 1987; FERNANDES et al., 1999; VILLAS BOAS et al., 1999; ARAUJO; FERREIRA; CRUZ, 2004; GOMES et al., 2007).

O fornecimento de nitrogênio à cultura do milho também é de suma importância ao desenvolvimento radicular das plantas, que é favorecido por adequadas concentrações do nutriente na zona radicular, principalmente durante o período inicial de desenvolvimento da cultura, quando ocorre o maior fluxo de N para as raízes, favorecendo também a maior absorção deste elemento em estádios mais avançados no ciclo do milho (EDWARDS; BARBER, 1976; JENKINSON; FOX; RAINER, 1985; YAMADA, 1996). Contudo, Raij (1991) mencionou que quando o nitrogênio é disponibilizado em excesso, este pode provocar detrimento no desenvolvimento do sistema radicular em relação à parte aérea, deixando a cultura vulnerável em períodos de veranico podendo até causar problemas com acamamento. Majerowicz et al. (2002) obtiveram para plantas deficientes em N, correlação positiva de 0,86 entre a massa seca acumulada na parte aérea e nas raízes, indicando que a superfície radicular deve ser um caráter importante para o influxo de N sob condições de deficiência. Segundo Furlani, Bataglia e Lima (1985) plantas mais eficientes na absorção e utilização de nitrogênio teriam sistemas radiculares bem desenvolvidos, responsáveis por uma maior eficácia na absorção e translocação de N em meios onde as concentrações deste elemento são baixas. Em experimento conduzido em casa de vegetação, Hatlilgil, Olson e Compton (1984) verificaram que o maior desenvolvimento do sistema radicular do milho, proporcionou maior acúmulo de massa seca total e produção de grãos.

A absorção de N pelas plantas de milho pode ocorrer tanto na forma nítrica (NO_3^-) quanto na forma amoniacal (NH_4^+), embora o grau de desenvolvimento da cultura seja determinante na forma e quantidade do elemento a ser absorvido. A maior demanda por nitrogênio inicia-se no estágio em que as plantas apresentam de quatro a cinco folhas expandidas, de maneira que a não suficiência deste nutriente nessa fase de crescimento, pode afetar negativamente a produção de grãos (SCHREIBER; STANBERRY; TUCKER, 1998; DUETE et al., 2009). Para Mengel e Barber (1974) a quantidade de N absorvida pela cultura do milho aumenta progressivamente durante a sua fase vegetativa, atingindo o máximo de absorção no início do estágio reprodutivo e diminuindo no estágio de florescimento e posterior enchimento dos grãos. Cantarella (1993) e Yamada e Abdalla (2000) relataram que a absorção de N pelo milho é mais intensa no período que compreende o intervalo de 40 a 60 dias após a emergência das plantas, mas que essa absorção corresponde a apenas metade do N requerido pela cultura, sendo que 50% podem ser absorvidos durante o estágio reprodutivo.

2.3 Eficiência da adubação nitrogenada

Em todo o mundo, a crescente demanda por alimentos, e a busca por maiores produtividades das plantas cultivadas, acarretou em drástico aumento no emprego de fertilizantes nitrogenados, visando assegurar os atuais níveis de produção. Para algumas culturas como o milho, foi verificado aumento de aproximadamente 15 vezes na dose de N-fertilizante empregada nos últimos 40 anos, correspondendo a 40% do custo de produção da cultura (MACHADO, 1997; SHAVIV, 2000; MAJEROWICZ et al., 2002).

A maior parte dos fertilizantes nitrogenados utilizados na cultura do milho são facilmente solúveis em água (ureia, sulfato de amônio e nitrato de amônio), e são rapidamente liberados no solo nas formas prontamente assimiláveis pelas plantas, como nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+), sendo também as formas mais suscetíveis a perdas no sistema agrícola. Devido o nitrogênio ser altamente dinâmico no sistema solo-planta, este elemento se encontra em constante transformação, o que dificulta uma avaliação precisa de sua disponibilidade (SANTOS, 2008).

Diversos autores mencionaram que a eficiência no uso do fertilizante nitrogenado (EUFN) pela cultura do milho não passa de 50%, sendo para maioria dos cereais de aproximadamente 33%, principalmente para cultivos realizados durante as estações mais quentes e chuvosas do ano, que favorecem o aumento no potencial de perdas de N no sistema (FIRESTONE, 1982; RAUN; JOHNSON, 1999; TRIVELIN et al., 2002; FAN et al., 2004; OORTS et al., 2007; GHIBERTO et al., 2009). Grove (1980) sugeriu que a EUFN deve ser mensurada pela recuperação líquida do N, sendo esta obtida pela relação entre o aumento da quantidade de N na matéria seca por unidade de fertilizante aplicado, obtendo dessa maneira a melhor relação entre o N absorvido pela cultura e o N aplicado. Vários foram os trabalhos realizados na região do Cerrado onde a EUFN máxima obtida para cultura do milho foi em torno de 50% (GROVE, 1980; COELHO et al., 1991; FERNANDES et al., 1999).

Em estudo de campo, implantado sob sistema de plantio direto visando avaliar o balanço do ^{15}N no sistema solo-planta na cultura do milho, em função da aplicação de N-fertilizante, Gava et al. (2006) verificaram que do total de N acumulado pela parte aérea das plantas, em média apenas 25% foi proveniente do fertilizante, sendo o restante proveniente de outras fontes, corroborando com resultados obtidos por Coelho et al. (1991), Duete (2000) e Lara Cabezas et al. (2000) que chegaram a valores de recuperação de 31, 28 e 24% respectivamente. A EUFN para parte aérea das plantas foi de 34%, semelhante aos 33% em média obtidos por Liang e Mackenzie (1994). Gava et al. (2006) ainda verificaram que o total

recuperado no sistema solo-planta foi de 69 e 80%, respectivamente, no sistema de plantio convencional e semeadura direta, não sendo recuperado em média 25% de N-fertilizante. Resultados semelhantes haviam sido relatados por Villas Boas (2005) que obteve recuperação média de 73% no sistema solo-planta, e perdas de 27% do N-fertilizante empregado.

Segundo Reddy e Reddy (1993) a disponibilidade de N no sistema, assim como a eficiência de uso deste pela cultura do milho, é influenciada principalmente pela fonte utilizada, pela época de aplicação, e condições climáticas durante a fase de crescimento das plantas. Devido sua dinâmica, o aproveitamento do nitrogênio dos fertilizantes pelas culturas é relativamente baixa, chegando, em muitos casos, a menos de 50% como mencionado anteriormente, sendo o restante, emitidos para atmosfera como amônia por volatilização e óxidos de nitrogênio (NO e N₂O) causado pelos processos de nitrificação e desnitrificação, perdido para sistemas aquáticos por meio de lixiviação do nitrato e/ou escoamento superficial, e armazenado no solo predominantemente sob formas orgânicas, podendo ou não ser disponibilizados para as próximas culturas (ANGHINONI, 1986; HARRIS et al., 1994; LARA CABEZAS et al., 2000; MOSIER; KROESE, 2000; SCIVITTARO et al., 2000; 2003; GALLOWAY et al., 2004).

2.4 Perdas de N no sistema

2.4.1 Volatilização

A perda de nitrogênio por volatilização de amônia é uma das principais responsáveis pela baixa recuperação e eficiência no uso dos fertilizantes nitrogenados, sendo mais agravante quando o insumo utilizado trata-se da ureia, principalmente quando esta é aplicada em superfície. Esse processo ocorre quando a ureia é aplicada na superfície do solo, sem ocorrer sua incorporação por meio da água de chuva ou irrigação, ocorrendo dessa maneira a hidrólise da ureia e a volatilização do gás amônia (NH₃) podendo acarretar em perdas de até 70% (RODRIGUES; KIEHL, 1986; FRANCIS; SCHEPERS; VIGIL, 1993; GRIGGS et al., 2007). O processo de hidrólise e volatilização de amônia pode ser influenciado por diversos fatores relacionados aos atributos físico-químicos do solo como pH, teor de umidade, porcentagem de argila, carbono orgânico e capacidade de troca catiônica (CTC), além do modo de aplicação do fertilizante (TRIVELIN; LARA CABEZAS; BOARETTO, 1994; VAIO et al, 2008).

A volatilização do N-ureia ocorre devido esta sofrer o processo de hidrólise enzimática, resultante da ação da urease (enzima presente no solo) que transforma a molécula de ureia em

carbonato de amônia, que provoca a elevação do pH ao redor do grânulo, podendo haver perdas por volatilização quando este adubo é aplicado superficialmente (VOLK, 1959; SENGIK; KIEHL 1995; COSTA; VITTI; CANTARELLA, 2003; CANTARELLA; MARCELINO, 2007).

A volatilização da amônia pode ocorrer pela diferença nas concentrações de amônia na atmosfera e a daquela na solução do solo, na água ou nas folhas das plantas (FRENEY; SIMPSON; DENMEAD, 1983). O transporte do NH_3 do solo à atmosfera também ocorre juntamente à evaporação da água do solo (FRENNEY et al., 1992). Lara Cabezas e Souza (2008) verificaram perdas de 78,6% do N aplicado superficialmente na forma de ureia na cultura do milho. Resultados similares foram encontrados por Lara Cabezas, Korndorfer e Motta (1997) e Lara Cabezas et al. (2000) que relataram 78 e 80% de volatilização respectivamente. Vitti et al. (2002) obtiveram 40% de volatilização do nitrogênio aplicado sobre palhada de cana-de-açúcar, enquanto Volk (1959) registrou perdas de 29,3% do N aplicado na forma de ureia a superfície do solo cultivado com pastagem.

2.4.2 Nitrificação e desnitrificação

O uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura exerce efeitos diretos e indiretos nas emissões de gases a atmosfera, principalmente nas formas de NO e N_2O . Esses gases emitidos para atmosfera são resultantes da atividade dos microrganismos do solo durante os processos de nitrificação e desnitrificação (SMITH, 1997). As gerações desses gases devem ser atentamente monitoradas, pois o N_2O gerado por meio desses processos, além de ser um gás importante contribuidor no efeito estufa, também contribui para a destruição da camada de ozônio (BOUWMAN, 1990; KROEZE; MOSIER; BOUWMAN, 1999; CHIKOWO et al., 2004).

No solo o N amoniacal pode ser diretamente absorvido pelas plantas, no entanto em solos bem drenados ocorre o processo de nitrificação por meio de ação microbiana,

transformando-o em nitrato, reação na qual também pode ocorrer a formação de N_2O , que pode ser perdido para atmosfera. Robertson (1997) e Burger e Jackson (2003), mencionaram que a transformação do NH_4^+ em NO_3^- é o maior destino deste elemento no solo. Este processo é realizado em duas etapas distintas, sendo a primeira denominada de nitrificação, onde o NH_4^+ é transformado a NO_2^- por um grupo de bactérias aeróbias conhecidas como *Nitrossomona sp*, e a segunda etapa denominada nitratação em que ocorre a transformação de NO_2^- para NO_3^- por meio de um grupo de bactérias *Nitrobacter sp* (BURTON; PROSSER, 2001).

Os principais fatores que afetam a nitrificação são pH, temperatura, umidade e aeração do solo, sendo que este processo também pode variar tanto espacialmente quanto temporalmente (BLOOM, 1997). Em condições alcalinas o processo de nitrificação não é completo, e a forma predominante é a do NO_2^- , devido as bactérias *Nitrobacter sp* serem inibidas pela presença de amônia, que é formada em condições de pH elevado (GOOSSENS, 2001).

Em solos com falta de O_2 , como os mal drenados ou com excesso de matéria orgânica facilmente decomponível, atuam os microrganismos denominados desnitrificadores que sob condições anaeróbias utilizam o NO_3^- comoceptor final de elétrons em sua respiração. Esse processo é conhecido como desnitrificação definido como o de redução do NO_3^- ou NO_2^- a NO , N_2O e N_2 por bactérias anaeróbias facultativas dos gêneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Flavibacterium* e *Agrobacterium*, ocorrendo perdas gasosas nas formas de N_2 e N_2O (ROBERTSON; GROFFMAN, 2007).

Embora alguns trabalhos demonstrem que as perdas de N na forma de N_2O sejam baixas (1,25 % do N-fertilizante aplicado (Dalal et al., 2003)), sob condições favoráveis essas perdas

podem ser muito maiores, como observado por Denmead et al. (2010) que sob condições específicas de solo inundado na Austrália, extremamente favorável a desnitrificação, atribuíram a este processo, 21% das perdas do N-ureia. Dobbie, McTaggart e Smith (1999) encontraram perdas por desnitrificação variando de 0,3 a 18,4 kg ha⁻¹ de N-N₂O para sistemas cultivados com cana-de-açúcar, pastagens e florestas tropicais. Trivelin et al. (2002) em estudo do ciclo do nitrogênio em solo cultivado com cana-de-açúcar, sugere que parte dos 12% do N-ureia não recuperado no ciclo da cana-planta, pode ter sido devido as perdas por desnitrificação. Para Hauck (1981), a transformação do N-NO₃⁻ presente no solo para formas gasosas (N₂O e N₂) pelo processo de desnitrificação, é responsável por aproximadamente 1/3 das perdas de N-fertilizante no sistema solo-planta.

2.4.3 Lixiviação

O processo de lixiviação é o resultado da liberação de íons em sua forma solúvel para a solução do solo, e do deslocamento destes através do movimento descendente da água no perfil do solo, acarretando na remoção destes íons (GHIBERTO et al., 2009). Além de prejuízos econômicos, as perdas de N por lixiviação de NO₃⁻ podem resultar na contaminação de águas superficiais e subterrâneas, gerando problemas como a eutrofização de rios e lagos, e oferecendo também riscos a saúde humana, sendo relatado que concentrações de N-NO₃⁻ acima de 10 ppm na água de consumo, pode causar problemas como a metahemoglobinemia infantil (United States Environmental Agency - USEPA, 1985; Comissão de Política Ambiental - COPAM, 1986).

A quantidade de íons a ser lixiviado, depende diretamente da concentração deste na solução do solo, e do volume de água drenada. Exner et al. (1991) em trabalho feito com diferentes taxas de aplicação de N, em sistema irrigado, verificaram movimento do NO₃⁻ em grande profundidade no perfil do solo, sendo 95% do NO₃⁻ aplicado, lixiviado para camadas abaixo da explorada pelo sistema radicular da cultura. Cooper et al. (1984) em estudo com a cultura do milho, onde foram testadas aplicações sucessivas de esterco como fonte de N, observaram que em concentrações acima das exigidas pela cultura apenas 10% do N foi utilizado pelas plantas, enquanto o restante foi perdido no sistema ou retido no perfil do solo, aumentando dessa maneira os riscos de lixiviação.

Maia e Cantarutti (2004) destacaram que a alta mobilidade do NO₃⁻ também é dependente da quantidade e fonte nitrogenada adicionada ao sistema, assim como a predominância de cargas negativas no complexo coloidal do solo que impede que os íons sejam adsorvidos, permanecendo na solução do solo. Steege, Stulen e Mary (2001) relataram

que a textura do solo assim como sua distribuição de poros também são importantes fatores que devem ser considerados quanto a mobilidade do NO_3^- , esses autores mencionaram que solos arenosos possuem menor capacidade de retenção de água que solos argilosos, aumentando o potencial de perdas nitrogenadas pelo processo de lixiviação. Piovesan et al. (2009) em estudo conduzido em solo argiloso, verificaram que a relação do N-NO_3^- perdido no perfil do solo em relação ao aplicado, é muito maior comparativamente a outros íons presentes na solução do solo, evidenciando o alto potencial de lixiviação do NO_3^- mesmo para este tipo de solo.

A quantidade de matéria orgânica presente no solo também é fator de significativa importância quanto à lixiviação do NO_3^- . Kanwar, Baker e Baker (1988), após realizarem estudos simulando volumes de precipitação, observaram que em condições mais severas com grande quantidade de água adicionada ao solo, a lixiviação do N aplicado pode chegar a 30% para um solo sob sistema de plantio convencional, enquanto para um solo sob sistema de plantio direto o total lixiviado foi de apenas 6%, evidenciando a importância da matéria orgânica como agente estabilizador de agregados do solo, possibilitando maior retenção de NO_3^- .

2.5 Aumento da eficiência no uso do fertilizante nitrogenado

Dentre as várias fontes de nitrogênio utilizadas na cultura do milho a ureia é a mais empregada no Brasil. Isso se deve à sua alta solubilidade em água, a adequada assimilação dos produtos de sua hidrólise pelas plantas e ao teor de N no fertilizante (45% N), o que favorece o transporte, estocagem, manuseio e a aplicação no campo, no solo ou por via foliar (CANTARELLA, 1992). Entretanto a baixa eficiência de recuperação aliada à doses relativamente altas do insumo que são aplicadas no solo, tem nos últimos anos gerado preocupação crescente com respeito a poluição ambiental, que é proveniente do manejo inadequado da fertilização nitrogenada, podendo ocorrer a contaminação dos recursos hídricos por nitrato e a emissão de óxido nitroso para atmosfera (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002).

As perdas de N ocorridas pelo manejo inadequado da ureia também tem elevado o custo de produção nos diferentes sistemas. Em levantamento realizado por Raun e Johnson (1999), se for considerado que em média 67% do N que são aplicados ao sistema não são aproveitados pelas plantas, tem-se uma perda anual de 15,9 bilhões de dólares em fertilização nitrogenada. Portanto é de suma importância o estudo de novas fontes e técnicas de manejo que sejam adequadas aos ambientes de produção, de maneira a reduzir os possíveis impactos

gerados pelo emprego desse insumo.

O aumento da eficiência no uso do fertilizante nitrogenado pode ser alcançado por meio da rotação de culturas, melhoramento genético, uso de sistemas conservacionistas, mapeamento de solo, uso da agricultura de precisão, e práticas de manejo do fertilizante como incorporação, diminuição e parcelamento das doses aplicadas, assim como a mistura de fontes nitrogenadas (RAUN; JOHNSON, 1999).

A rotação e sucessão de culturas com a utilização de espécies fixadoras de nitrogênio, que produzam para a cultura subsequente resíduos de baixa relação C:N, aliado a um sistema conservacionista que favoreça a manutenção e acúmulo desses resíduos, tem-se mostrado eficiente no auxílio ao aumento da eficiência do N. Burger e Jackson (2003), sugerem que uma forma alternativa de adição de N ao sistema, seria a adição de altas doses de matéria orgânica ao solo, para que ocorra liberação gradual do N desses resíduos. Em estudo de campo conduzido durante um período de três anos consecutivos, sob sistema de rotação de culturas (soja/arroz/milho) com o cultivo de *Crotalárea juncea* no período da entressafra, Mascarenhas et al. (1998) observaram que o N residual fornecido pelos restos culturais da crotalária favoreceu o aumento da produtividade de milho e arroz, quando comparado com sistema de monocultivo para os mesmos.

O melhoramento genético de plantas também pode ser uma ferramenta utilizada em sistemas mais eficientes no uso do N. A obtenção de plantas menos exigentes em fertilidade, com melhor conformação espacial do sistema radicular a fim de possibilitar a maior exploração do volume de solo, como também de plantas mais eficientes fotossinteticamente, possibilitando maior população de indivíduos por área, podem ser soluções para o aumento da produção agrícola com emprego de quantidades menores de fertilizantes, embora para tanto se necessite de longo prazo de desenvolvimento (CECCARELLI, 1996).

A incorporação da ureia ao solo consiste num eficiente método para diminuição das perdas de N por volatilização de amônia, já que esta se encontra em subsuperfície diminuindo, dessa maneira, as perdas de N em formas gasosas (CANTARELLA, 1993; LARA CABEZAS; KORNDORFER; MOTTA, 1997). No entanto, embora eficiente, essa prática se restringe a adubação realizada no momento do plantio, já que a incorporação da ureia em subsuperfície na adubação nitrogenada de cobertura, ainda é pouco utilizada pelos produtores, devido principalmente ao custo operacional e ao dano que esta incorporação pode causar ao sistema radicular das culturas (RODRIGUES; KIEHL, 1986). Coelho (1987) estudando o balanço do ^{15}N na cultura do milho em um solo de cerrado constatou que a aplicação de todo o N no plantio resultou em maior acúmulo de matéria seca por unidade de N aplicada, quando

comparado com aplicação de cobertura.

Reddy e Reddy (1993) observaram para a cultura do milho que o N perdido do sistema aumentou em cerca de três vezes quando a dose aplicada passou de 100 para 200 kg ha⁻¹ de N. Resultados de experimentos realizados por Villas Boas et al. (1995) e Jokela e Randall (1997) também apontam para queda na eficiência no uso do N com o aumento das doses empregadas. Dessa maneira uma das práticas realizadas para otimização do uso do N-fertilizante, é a aplicação de menores doses de N por meio do parcelamento da adubação nitrogenada, sendo essa relatada como eficiente por diversos autores na literatura (VILLAS BOAS, 1995; ESCOSTEGUY; RIZZARDI; ARGENTA, 1997; VILLAS BOAS et al., 1999; DUETE, 2000; GOMES et al., 2007).

A menor eficiência no uso do N-ureia é devida as diversas rotas de perdas que podem ocorrer quando comparado com outras fontes nitrogenadas, sendo portanto a mistura da ureia com outros fertilizante uma das maneiras de se minimizar as perdas de N no sistema. Lara Cabezas e Couto (2007) comparando a aplicação de ureia e mistura de ureia + sulfato de amônio, observaram ao final do ciclo do milho recuperação de 82,5 e 59,9% do N-aplicado para ureia + sulfato de amônio e ureia respectivamente, mostrando maior eficiência de recuperação para a mistura de fertilizantes. Resultado semelhante foi relatado por Villas Boas et al. (2005) que observaram, aos 66 dias após a germinação das plantas de milho, recuperação de 67% do ¹⁵N aplicado na forma de ureia + sulfato de amônio.

2.6 Ureia revestida por polímero

Atualmente vem crescendo o número de estudos realizados na tentativa de aumentar a eficiência no uso do fertilizante nitrogenado por meio do recobrimento de fertilizantes com polímeros que podem agir tanto na inibição de enzimas como a urease, quanto na taxa de difusão dos elementos pelos grânulos do adubo. Bockman e Olf (1998) explicaram que o uso de inibidores de uréase podem reduzir a hidrólise das moléculas de ureia diminuindo dessa maneira as perdas por volatilização de amônia. Os mesmos autores ainda afirmaram que os inibidores também podem retardar a oxidação do amônio para nitrato, prevenindo a formação de N₂O antes de sua absorção como nutriente pelas plantas. Rambo et al (2004) ressaltaram a importância da sincronia entre a época de aplicação do adubo nitrogenado e a disponibilização de N, nos estádios de maior necessidade de N pela cultura, visando aumentar a eficiência do uso do nitrogênio.

Bono et al. (2008) sugeriram como alternativa para a redução das perdas de N o envolvimento do grânulo de ureia por algum produto menos higroscópico, que permitisse a

lenta liberação do N-ureia, e aumentasse a eficiência de sua utilização por culturas. Nesse sentido Shaviv e Mikkelsen (1993) mencionaram a utilização de adubos encapsulados de liberação gradual que, em princípio, permitiriam que o nitrogênio fosse liberado gradativamente no solo, à medida que aumenta a necessidade da cultura pelo nutriente, reduzindo a possibilidade de perdas de N devido a altas concentrações deste elemento no meio.

Os fertilizantes revestidos podem ser de dois tipos: estabilizadores, e de lenta liberação ou liberação controlada (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009). Os fertilizantes estabilizadores são geralmente solúveis em água, e recobertos com aditivos ou polímeros que tem a capacidade de alterar ou inibir os processos enzimáticos e microbianos do solo, enquanto os fertilizantes de lenta liberação ou liberação controlada apresentam baixa solubilidade em água, e permitem a lenta liberação de N ao sistema, por um determinado período de tempo. O recobrimento destes fertilizantes pode ser realizado por meio de polímeros inorgânicos, orgânicos ou sintéticos, sendo essas substâncias derivadas em sua maioria de poliamidas ou enxofre elementar.

A durabilidade e a intensidade de liberação do N por esses fertilizantes é diretamente dependente do material de recobrimento, da espessura da resina utilizada, de microfissuras em sua superfície e também do tamanho do grânulo do fertilizante (GIRARDI; FILHO, 2003). Segundo Chitolina (1994) a taxa de liberação de nutrientes dos fertilizantes revestidos com polímeros, também está diretamente ligada ao conteúdo de água e a temperatura do solo, uma vez que esses podem aumentar a permeabilidade desses compostos, aumentando por sua vez a taxa de difusão dos elementos neles presentes.

Shaviv (2000) relatou que os principais benefícios gerados pelo uso de ureias revestidas com polímero são: a redução do stress e toxicidade devido à alta concentração salina junto à semente e ao sistema radicular das plantas; aumento da disponibilidade de nutrientes por aumentar estes na solução do solo; suprimento do N nas formas preferencialmente absorvidas pelas plantas (NO_3^- e NH_4^+) devido à lenta liberação desfavorecer a imobilização por microrganismos do solo; aprimoramento dos efeitos sinérgicos entre os nutrientes, por não haver desequilíbrio na proporção de N e os demais íons; menor risco de contaminação ambiental por lixiviação de NO_3^- e emissão de NH_3 , NO e N_2O para atmosfera. Entretanto o uso de fertilizantes revestidos ainda é muito reduzido devido, principalmente, ao custo elevado que este insumo apresenta, sendo necessário melhor desenvolvimento de produtos que possam ser amplamente empregados na agricultura de maneira a ser economicamente e agronomicamente mais favoráveis quando comparados com os adubos nitrogenados padrões (GOLDEN et al., 2009).

Diversos autores relataram os benefícios no emprego de fertilizantes revestidos com polímeros. Em cultura de cevada, utilizando a técnica do traçador isotópico ^{15}N , Shoji et al (2001) verificaram recuperação do N fertilizante de 66% quando este foi de liberação gradual, aumentando portanto a eficiência na utilização do fertilizante, quando comparado a estudos com fertilizantes convencionais. Os mesmos autores ainda observaram que as emissões de N_2O para os tratamentos em que foram utilizadas ureias revestidas com inibidor enzimático

ou por polímero de lenta liberação, foram respectivamente 81 e 35% menores em relação à ureia convencional. Nesse mesmo sentido, Bronson e Mosier (1993), Cheng et al. (2002) e Bandyopadhyay e Sakar (2005), também observaram menores emissões de N_2O com o emprego de ureia de liberação gradual nas culturas de trigo, couve chinesa e arroz irrigado respectivamente.

Quanto a volatilização de amônia, em estudo conduzido na cultura do milho safrinha, Pereira et al. (2009) observaram que os tratamentos com ureia revestida por polímero de lenta liberação e ureia revestida com inibidor de urease proporcionaram redução de aproximadamente 50% na volatilização de NH_3 em relação à ureia comum, tanto na primeira quanto na segunda cobertura nitrogenada. Foi demonstrado que o revestimento da ureia e o inibidor da urease foram eficientes na redução da volatilização do N-ureia aplicados em cobertura, o que refletiu em maiores produtividades.

Em experimento realizado em casa de vegetação, Mikkelsen, Williams e Behel (1994), obtiveram maiores perdas de N por lixiviação do NO_3^- quando aplicado fertilizante convencional do que quando aplicado fertilizante revestido. Wang e Alva (1996) observaram que até 30% de N-nitrato de amônio foi lixiviado em um solo arenoso, quando aplicado na forma de fertilizante de liberação gradual, em comparação com mais de 88% quando aplicada na forma de nitrato de amônio convencional. Wilson, Rosen e Moncrief (2009) também relatam menores concentrações de NO_3^- em amostras de solo, quando utilizado ureia de liberação gradual em relação ao tratamento onde foi aplicado N solúvel.

Em relação à eficiência de fertilizantes revestidos em culturas agrícolas, Cheng et al. (2002), verificaram que a utilização de ureia recoberta contribuiu positivamente no peso de plantas de repolho quando comparado com tratamentos em que foi utilizada ureia convencional, além de ter possibilitado redução de até 20% na dose recomendada, aumentando dessa maneira sua eficiência. Para cultura da cevada foi observada a proliferação de raízes em torno do grânulo da ureia recoberta, sendo a absorção desta relacionada ao melhor desenvolvimento radicular (ZHANG et al., 2000). Em experimento de campo com trigo de inverno, Fan et al. (2004) constataram que o rendimento máximo da cultura e a eficiência na utilização do N, foram maiores nos tratamentos com ureia recoberta em comparação aos com ureia comum. Ensaios realizados no Canadá, também com trigo, mostraram que o rendimento de sementes colocadas junto a ureia recoberta foram similares aos rendimentos com ureia comum, porém as concentrações de N no primeiro tratamento foram superiores, resultando em eficiência de utilização 4,2% maior (HADERLEIN et al., 2001).

Para cultura do milho existem poucos trabalhos na literatura que demonstram os efeitos da aplicação de fertilizantes nitrogenados recobertos com polímeros. Bahr, Zeidan e Hozayn (2006) verificaram aumento na concentração de NPK, proteína e óleo nos grãos de milho

quando utilizado fertilizante nitrogenado de lenta liberação, mesmo em doses inferiores em relação ao controle (ureia não recoberta). Segundo os autores, o resultado deveu-se ao constante suprimento de N às raízes, minimizando as perdas do sistema se comparado com a ureia não recoberta. Resultados semelhantes foram reportados por Wuerst e Cassman (1992) para a cultura do trigo em que a concentração de proteína dos grãos para os tratamentos com ureia recoberta com polímero foi 0,75% maior que nos tratamentos com ureia convencional.

Bono et al. (2008) obtiveram resultados positivos na melhoria da qualidade fisiológica das sementes de milho com a aplicação de ureia recoberta com polímero em comparação a convencional, fato ocorrido principalmente pela liberação gradual de N, garantindo adequado fornecimento do nutriente durante o crescimento da cultura. Os mesmos autores constataram, ainda, que a aplicação de todo o nitrogênio na semeadura, na forma de ureia recoberta, possibilitou melhor utilização do N na produção de sementes de milho, se comparado com a adubação parcelada.

2.7 Avaliação da eficiência do uso do N do fertilizante

Diversos são os índices que podem ser utilizados para avaliar a eficiência do fertilizante aplicado. Esses índices podem ser obtidos por métodos indiretos ou diretos. O método indireto consiste no cálculo da eficiência através do método da diferença, que é realizado por meio do cálculo da diferença das quantidades de nutriente extraídas entre o tratamento teste e o controle. Embora muito utilizado, este método não apresenta vantagens adicionais para entender as boas práticas de manejo do fertilizante. Para melhor compreender essas práticas são necessários estudos mais detalhados dos nutrientes nos agroecossistemas através de metodologia direta, como por meio do uso de isótopos, os quais permitem melhor compreensão da dinâmica do elemento no sistema como perdas, imobilização, fixação e mecanismos de liberação.

2.7.1 Método direto ($\delta^{15}\text{N}$)

Na natureza, a matéria é constituída de átomos de elementos químicos, que são constituídos por um núcleo carregado positivamente localizado em seu centro e os elétrons de carga negativa que giram ao seu redor. No núcleo dos átomos dos elementos, são constituintes os prótons carregados positivamente e os nêutrons, que são partículas sem carga e que junto aos prótons definem a massa do átomo. O número de prótons no núcleo é característico de cada elemento químico, embora o número de nêutrons possa variar para átomos de um mesmo

elemento. Átomos que possuem o mesmo número de prótons e diferentes números de nêutrons são chamados de isótopos do elemento (TRIVELIN, 2004).

Dentre os isótopos de um elemento existem os estáveis (^{14}N e ^{15}N), que não emitem radiações e ocorrem na natureza em proporções quase constantes ($^{14}\text{N} = 99,634\%$ e $^{15}\text{N} = 0,366\%$). Por abundância ou concentração isotópica (% em átomos do isótopo), entende-se a percentagem de um isótopo em relação a todos do mesmo elemento que ocorrem naturalmente. Os isótopos estáveis podem ser utilizados em pesquisas agrícolas, tanto na proporção de isótopos diferente daquela de ocorrência natural (compostos marcados ou enriquecidos), como por meio de medidas das variações na abundância isotópica natural (RENIE; PAUL; JOHNS, 1976; TRIVELIN, 1976; RENNIE, 1986).

A abundância natural do ^{15}N é resultado do desvio relativo em ‰ da relação $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ do N_2 atmosférico, sendo expressa como $\delta^{15}\text{N}$, onde: $\delta^{15}\text{N} = 1000 ((^{15}\text{N}:^{14}\text{N}_{\text{amostra}} - ^{15}\text{N}:^{14}\text{N}_{\text{ar}}) / ^{15}\text{N}:^{14}\text{N}_{\text{ar}})$. Durante o processo de mineralização do N no solo, ocorre um forte fracionamento nas reações de nitrificação e desnitrificação, que deixam a fração do produto empobrecida em ^{15}N enquanto ocorre o enriquecimento do substrato (DELWICHE; STEYN, 1970). Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ podem variar de -15‰ (NH_4^+ atmosférico) até $+10\text{‰}$ (solo) (YONEYAMA, 1996). Entretanto se as plantas utilizarem o N_2 atmosférico ou o N proveniente de fertilizantes industriais, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ na planta serão próximos a 0‰ , e se for utilizado N e outras fontes como NH_4^+ e NO_3^- do solo, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ serão diferentes e normalmente superiores a 0‰ . Portanto os valores de $\delta^{15}\text{N}$ na planta variam de acordo a abundância isotópica do solo e da variação causada pela adubação (ROBINSON; HANDLEY; SCRIMGEOUR, 1998; ROBINSON, 2001; CHOI et al., 2002).

A metodologia isotópica além de ser uma ferramenta direta na estimativa da eficiência de recuperação do fertilizante nitrogenado, apresenta a vantagem de avaliar o uso do nitrogênio que foi aplicado via fertilizante, pois permite distinguir a origem do elemento usado pela planta, bem como a partição deste entre as partes da planta depois de absorvido (ANDREUCCI, 2007). No entanto este método apresenta algumas desvantagens como o alto custo de análise. Outra desvantagem que pode ser verificada na metodologia isotópica, é que esta pode ser influenciada pela “pool substitution” do ^{15}N por ^{14}N , que pode resultar em uma recuperação errônea caso essa substituição não seja levada em consideração. Segundo Jenkinson, Fox e Rainer (1985) o N marcado pode ser substituído pelo N não marcado do solo, que de outra maneira poderia ter sido utilizado nos processos de imobilização e desnitrificação pelos microrganismos do solo, diminuindo a disponibilidade de ^{15}N para as plantas, podendo levar a menores valores de recuperação. Rao et al. (1991) menciona que os

principais fatores que devem influenciar a estimativa da eficiência na recuperação do N fertilizante pelo método isotópico, são o carbono orgânico do solo, a relação C:N, e a biomassa microbiana, que irão afetar a “pool substitution” via imobilização, desnitrificação e mineralização. Os valores finais de $\delta^{15}\text{N}$ também podem ser fortemente influenciados pelos fracionamentos ocorridos durante o ciclo do nitrogênio, no qual ocorre a discriminação dentre as formas isotópicas ^{14}N e ^{15}N durante os processos de fixação, volatilização, nitrificação, desnitrificação, imobilização e assimilação de N pelas plantas, como descrito por Delwiche e Steyn (1970) e Yoneyama (1996).

2.7.2 Métodos indiretos

O método indireto é o método mais comum utilizado para o cálculo da eficiência no uso dos fertilizantes. De acordo com Dobermann (2007) este método pode se calculado por meio de diversos índices, como: Recuperação Aparente (RA), calculado por meio do aumento do nutriente recuperado pelas plantas em relação à planta controle, em função do nutriente aplicado; Eficiência Fisiológica (EF), obtida através do aumento de produtividade pelo aumento do nutriente recuperado pelas plantas; Utilização Interna (UI) do fertilizante, obtida pela relação entre produtividade e a recuperação do nutriente; Eficiência Agronômica (EA), realizada pelo aumento de produtividade por unidade de nutriente aplicado; e Fator Parcial de Produtividade (FPP), calculada pela relação entre produto colhido e nutriente aplicado.

O uso de métodos indiretos tem como vantagens o baixo custo e a maior praticidade no processo de avaliação e análise laboratorial. Entretanto estes métodos apresentam a incapacidade de distinguir o nitrogênio recuperado do fertilizante, daquele proveniente do solo ou atmosfera, além de considerar que as transformações do N no solo, assim como o desenvolvimento dos compartimentos das plantas tratamento, são os mesmos da planta controle, o que não é verdadeiro, podendo superestimar os valores de N recuperado (RAO et al., 1991; KUZUYAKOV; FRIEDEL; STAHR et al., 2000; ANDREUCCI, 2007; MELLO et al., 2008).

Hauck e Bremmer (1976), afirmam que a superestimativa na recuperação do N fertilizante pelo método indireto pode ocorrer devido ao “priming effect”, principalmente em solos onde existe uma quantidade considerável de N orgânico. Segundo Jenkinson, Fox e Rainer (1985) esse efeito é definido como uma aceleração na mineralização natural do solo devido a um estímulo externo, ou seja, o fornecimento de uma energia facilmente decomponível a biomassa microbiana do solo, resultando em maior mineralização e maior disponibilidade do N do solo para as plantas.

Para Harmsen (2003), do ponto de vista agronômico, a recuperação aparente do N aplicado é preferível em relação ao método isotópico, pois é uma medida que reflete o efeito geral da aplicação de N em sua absorção ou rendimento da cultura, mesmo que este parâmetro possa ser superestimado em algumas medidas devido ao aumento na absorção do N mineral do solo. Este autor ainda afirma que os estudos com método isotópico são mais eficientes e devem ser preferidos em trabalhos onde busca-se o conhecimento e o destino do N no sistema solo-planta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O trabalho foi realizado em área experimental da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), localizada no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil (22°42' Latitude Sul, 47°38' Longitude Oeste e 560 metros de altitude), em casa de vegetação, no período compreendido entre Outubro de 2010 e Fevereiro de 2011.

3.2 Características do híbrido de milho utilizado

Foi utilizado o híbrido de milho AG 9045, fornecido para fins experimentais, desenvolvido pela empresa Monsanto, caracterizado como superprecoce de alto potencial produtivo, sendo as sementes utilizadas tratadas com os inseticidas Deltamethrin e Pirimifos-Metil, e os fungicidas Fludioxonil e Metalaxyl, a fim de garantir alto poder germinativo das sementes.

3.3 Caracterização química do solo

O solo utilizado foi retirado da camada superficial (0 – 20 cm) de um NEOSSOLO QUARTZARENICO Órtico típico (EMBRAPA, 2006). A Tabela 1 relaciona as características químicas de três amostras compostas.

Tabela 1 - Caracterização química do solo utilizado no experimento

Amostras	pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³							%	
Média	4,9	9,7	5,3	5,0	1,8	4,7	3,7	1	21,7	10,2	32,7	32	9,0

3.4 Delineamento estatístico e tratamentos

O delineamento estatístico utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições, no esquema fatorial, 4 fontes, 4 doses de N e 1 tratamento adicional (controle), com 4 avaliações no tempo. As fontes de N utilizadas foram: (a) Ureia fertilizante convencional (UC); (b) Ureia recoberta com polímero de lenta liberação a base de enxofre (UR1); (c) Ureia recoberta com polímero de lenta liberação (UR2); (d) Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel a base de poliacrilamida (UR3). As doses de N foram correspondentes a: (a) 50 mg dm⁻³ de N; (b) 100 mg dm⁻³ de N; (c) 150 mg dm⁻³ de N e (d) 200 mg dm⁻³ de N. No controle não foi aplicado N. Cada unidade experimental foi constituída de um vaso (7 L) sem

dreno, preenchido com 7 kg de terra fina seca ao ar (TFSA).

3.5 Implantação e desenvolvimento do experimento

3.5.1 Correção do solo

A partir da análise química das amostras de solo, este foi corrigido antes do plantio do milho. A quantidade aplicada de calcário foi realizada com base no cálculo para $V=60\%$, equivalente a $3,5 \text{ g vaso}^{-1}$, calcário dolomítico (PRNT=100%), determinada pelo método da Saturação por Bases (RAIJ et al., 2001). Juntamente com o corretivo foi aplicado 100 mg dm^{-3} de P na forma de superfosfato simples ($8,7 \text{ g vaso}^{-1}$), procedendo-se a mistura dos insumos a terra dos vasos. Em seguida a capacidade máxima de retenção de água do solo foi elevada a 70%, pela adição de água desionizada, e os potes lacrados e incubados durante um período de 15 dias.

3.5.2 Semeadura e adubação

Após a incubação, 6 sementes de milho (*Zea mays*) foram semeadas a 10 mm de profundidade em cada pote. Passado o período de germinação e desenvolvimento inicial das plântulas (aproximadamente 15 dias), foi realizado o primeiro desbaste do milho, deixando duas plantas por pote. Os potes foram irrigados e pesados diariamente em balança eletrônica, para a manutenção da capacidade máxima de retenção de água do solo. O segundo e último desbaste, foi realizado quando as plantas acumulavam 260,05 graus-dias (GD), ou seja quando apresentavam 3 folhas expandidas (17 DAS), deixando apenas uma planta por vaso para que não houvesse competição por N até o fim do experimento.

Em cada vaso foi aplicada solução contendo micronutrientes, com a dose nominal de 4 mg kg^{-1} de solo, de B (ácido bórico p.a.), Cu (sulfato de cobre p.a.), Zn (sulfato de zinco p.a.) e manganês (sulfato de manganês p.a.) aplicados junto ao desbaste das plantas de milho, ou seja, aos 15 dias após a semeadura (DAS). A adição de potássio foi parcelada em duas aplicações, sendo a primeira realizada junto à aplicação dos micronutrientes, e a segunda quando as plantas foram desbastadas pela segunda vez (17DAS), na dose de 150 mg dm^{-3} de K.

3.5.3 Aplicação dos tratamentos

A adubação com N foi realizada no momento em que a cultura apresentava 260,05 GD (17 DAS). Neste período as plantas de milho encontravam-se no estágio V3 de desenvolvimento (3 folhas totalmente desdobradas), estágio anterior ao V4 onde ocorre a definição do potencial produtivo, fazendo-se, portanto, necessária a adubação. A incorporação dos fertilizantes foi realizada fazendo-se sucros no solo distante 10 cm do colo da planta, e com 2 cm de profundidade, distribuindo-se o N-fertilizante no fundo dos sucros, sendo imediatamente fechados a fim de se evitar perdas por volatilização de amônia.

3.5.4 Controle fitossanitário

A fim de se evitar danos às plantas que viessem a resultar em dados errôneos de recuperação do nitrogênio aplicado, foi realizada, semanalmente, até a fase de florescimento, aplicação de Tracer (Inseticida não sistêmico de origem biológica do grupo químico das espinosinas) para controle da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*). Após o florescimento foram aplicados inseticidas para controle da lagarta da espiga (*Helicoverpa zea*), sendo eles: Karate (Inseticida de contato e ingestão do grupo químico piretróide); e Nomolt (Inseticida regulador de crescimento de insetos, inibidor da síntese de quitina pertencente ao grupo químico das Benzoilureias).

3.5.5 Temperatura e umidade relativa do ar

Durante todo o período experimental foram coletados os dados de umidade relativa e temperatura interna do ar da casa de vegetação, registrados a cada 15 minutos por meio de um “dataloger” (Figura 1).

Figura 1 – Temperatura ambiente e umidade relativa média diária durante o período experimental

3.6 Avaliações e determinações de N-total e de $\delta^{15}\text{N}$ em plantas e solo

Após a emergência das plântulas de milho foram realizadas 4 avaliações durante o desenvolvimento da cultura, correspondentes aos seguintes estádios vegetativos: (a) 466,7 GD (plantas com 6 folhas totalmente expandidas em média, 35 DAS); (b) 855,2 (plantas com 10 folhas totalmente expandidas em média, 59 DAS); (c) 1015,9 (as plantas em sua média apresentavam-se no estágio de florescimento e polinização, 68 DAS); (d) 1302,8 GD (em média as plantas estavam no estágio de grãos pastosos, 86 DAS). Em todas as avaliações, foram avaliadas fitomassa da parte aérea e do sistema radicular das plantas, massa de solo e o teor de N-total, $\delta^{15}\text{N}$, e também de N-NH_4^+ e N-NO_3^- das amostras de solo.

3.6.1 Parte aérea e sistema radicular

A parte aérea das plantas de milho foi cortada rente à superfície do solo. As raízes foram separadas do solo por catação manual e em seguida lavadas em água corrente sobre peneiras com malha de 1 mm. Todo o material vegetal de cada parte das plantas foi seco em estufa a 65 °C, até massa constante, para determinação da massa seca, e posteriormente triturado em moinho tipo Wiley, e as amostras acondicionadas em frascos fechados de plástico. As determinações de $\delta^{15}\text{N}$, N-total das amostras foram realizadas em espectrômetro de massas Hydra 20-20, contendo analisador automático de N e C, modelo ANCA-GSL, da SerCon Co., Krewé, UK (BARRIE; PROSSER, 1996).

3.6.2 Solo

A massa de solo úmida foi pesada, e três subamostras foram retiradas para as seguintes determinações: (1) da umidade, em estufa a 105 °C por 48 horas; (2) do N-total e $\delta^{15}\text{N}$ do solo proveniente do fertilizante; (3) do N-mineral do solo.

Para as determinações do N-total e $\delta^{15}\text{N}$, as amostras de solo foram secas ao ar até massa constante e posteriormente trituradas em moinho de bola. As determinações de $\delta^{15}\text{N}$, N-total das amostras de solo foram realizadas em espectrômetro de massas Hydra 20-20, contendo analisador automático de N e C, modelo ANCA-GSL, da SerCon Co., Krewé, UK (BARRIE; PROSSER, 1996). Para as determinações do N-mineral (NH_4^+ e NO_3^-) do solo as subamostras correspondentes foram armazenadas em congelador a uma temperatura próxima de -15°C, até a realização das análises químicas. A extração das formas inorgânicas de N do solo ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$) foram realizadas em uma subamostra de 10 g em base úmida, com KCl 2 mol L⁻¹ (solo e solução, na relação 1:5 – m/v), sob agitação por uma hora (BURESH; AUSTIN; CRASWELL, 1982). Nos extratos, o N inorgânico foi determinado por meio de sistemas de análise por injeção em fluxo (FIA). O N-NH_4^+ foi analisado por meio da formação de amônia em um meio alcalino, permeável em membrana hidrofóbica (PTFE), sendo o fluxo direcionado para uma cela de condutividade (REIS et al., 1997). As formas de N-nítrico ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$) foram determinadas simultaneamente por um método espectrofotométrico, mediante redução do nitrato a nitrito por coluna de cádmio coperizado, ocorrendo posteriormente reação do nitrito com sulfanilamida em meio ácido, formando um azo composto (GINÉ et al., 1980). Os resultados do N mineral foram corrigidos e expressos em peso de terra seca em estufa (TFSE), após a secagem de subamostras de solo a 105°C por 48 h.

3.7 Cálculos

3.7.1 Eficiência no uso do fertilizante (Método isotópico)

A recuperação do nitrogênio na planta e no solo proveniente do fertilizante foi calculada pela expressão:

$$\%N_{ppf} = \frac{a - c}{b - c} \cdot 100$$

sendo:

$\%N_{ppf}$ = Nitrogênio na planta ou solo proveniente do fertilizante (%);

$a = \delta^{15}\text{N}$ na planta ou solo;

$b = \delta^{15}\text{N}$ -fertilizante;

$c = \delta^{15}\text{N}$ da planta testemunha, ou solo testemunha;

O aproveitamento do N proveniente do fertilizante será calculada pela expressão:

$$N_{ppf} (g \text{ vaso}^{-1}) = \frac{\%N_{ppf} \cdot e}{100}$$

onde:

$N_{ppf} (g \text{ vaso}^{-1})$ = Nitrogênio na planta ou solo proveniente do fertilizante ($g \text{ vaso}^{-1}$);

e = Nitrogênio total presente na planta ou solo.

3.7.2 Eficiência no uso do fertilizante (Método da diferença)

Recuperação aparente (RA)

$$RA (\%) = \frac{U - U_0}{F} \cdot 100$$

Eficiência fisiológica do N aplicado (EF)

$$EF (kg \text{ kg}^{-1}) = \frac{Y - Y_0}{U - U_0}$$

Eficiência Agronômica (EA)

$$EA (kg \text{ kg}^{-1}) = \frac{Y - Y_0}{F} \text{ ou } EA = RA \cdot EF$$

sendo:

U – Total de nutriente recuperado no tratamento adubado

U_0 – Total de nutriente recuperado na testemunha

F – Quantidade de nutriente aplicado

Y – Produtividade no tratamento adubado

Y_0 – Produtividade na testemunha

3.8 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e, quando o teste F foi significativo, foi procedida a comparação das médias dos tratamentos pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para comparar as fontes de N. Foi feita análise de regressão para avaliar o efeito das doses de N nos parâmetros avaliados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Acúmulo de fitomassa pela cultura do milho em função da adubação nitrogenada.

Na tabela 2 são apresentados os resultados de acúmulo de massa seca nos diferentes órgãos da planta e planta inteira de milho em função dos tratamentos, nos quatro períodos de avaliações.

Ocorreu aumento no acúmulo de massa seca com a idade das plantas dentre as fontes estudadas, praticamente na mesma proporção, e em menor grau no tratamento testemunha (Tabela 2).

Na primeira avaliação (35 DAS) foi observada interação entre a dose (50 mg dm^{-3}) e a fonte UR2 para parte aérea das plantas de milho, sendo que a fitomassa do tratamento UR2 não diferiu do controle e do tratamento UR1, e foi inferior aos tratamentos UR3 e UC. Este resultado se deveu à característica de lenta liberação dessa ureia, que reduziu o fornecimento de N durante o período inicial de desenvolvimento da cultura, sendo este efeito mais acentuado nos tratamentos em que foram empregadas menores doses do N; entretanto, para a média das doses aplicadas não foi observada diferença. Em relação aos demais tratamentos, ainda aos 35 DAS, o tratamento com UR2 apresentou o menor acúmulo de massa seca para planta toda, sendo este comportamento também justificado pelo baixo acúmulo de massa seca da parte aérea das plantas.

Na 2ª avaliação (59 DAS) não foram verificadas interações para fontes e doses, tanto para parte aérea quanto para planta toda de milho, sendo que para a média das doses aplicadas, UR3 e UC foram superiores a UR1 e UR2 no acúmulo de massa seca, evidenciando as características de lenta liberação destes últimos.

Aos 68 DAS (3ª avaliação), embora UR3 e UC tenham apresentado as maiores médias de produção de fitomassa, o acúmulo de massa seca no tratamento UR2 tendeu a se equiparar a dos produtos de pronta liberação de N, não diferindo destes ao final do ciclo da cultura (86 DAS), enquanto UR1 se manteve inferior aos demais. Estes resultados corroboram com Zhang et al. (2000) que observaram para cultura de cevada maior disponibilidade do N-ureia convencional em relação aos produtos de lenta liberação de N no período inicial de desenvolvimento das plantas, mas a disponibilidade destes aumentou ao longo do período experimental.

Tabela 2 - Produção de massa seca de plantas de milho, em função dos tratamentos em quatro épocas

Tratamentos		Dias após o plantio (DAS)											
Doses (mg dm ⁻³)	Fontes §	35 (1ª avaliação)			59 (2ª avaliação)			68 (3ª avaliação)			86 (4ª avaliação)		
		P aérea	Raiz	Total	P aérea	Raiz	Total	P aérea	Raiz	Total	P aérea	Raiz	Total
		g planta ⁻¹			g planta ⁻¹			g planta ⁻¹			g planta ⁻¹		
50	UR 1	4,2 ab	5,0 a	9,2 a	29,8 a	8,2 ab	38,0 ab	41,9 a	8,5 ab	50,4 a	48,4 a	21,5 b	69,9 a
	UR 2	2,9 bc	4,1 a	7,1 ab	25,9 a	5,9 bc	31,9 ab	44,7 a	10,6 ab	55,3 a	50,4 a	14,4 b	64,8 a
	UR 3	5,4 a	5,7 a	11,1 a	39,2 a	14,7 a	53,9 a	53,8 a	12,6 ab	66,3 a	59,9 a	10,5 b	70,5 a
	UC	5,1 a	5,4 a	10,5 a	39,9 a	8,7 ab	48,7 ab	55,6 a	21,9 a	76,6 a	54,1 a	11,4 b	65,6 a
100	UR 1	4,1 ab	4,8 a	8,9 a	44,4 ab	9,8 b	54,3 b	64,6 a	17,6 b	82,3 a	73,8 a	13,3 b	87,2 a
	UR 2	3,3 b	4,1 a	7,4 ab	36,9 b	12,1 b	48,9 ab	58,2 a	14,7 b	72,9 a	76,5 a	18,9 b	95,4 a
	UR 3	5,1 a	4,7 a	9,8 a	56,9 a	12,9 b	69,9 a	73,5 a	16,9 b	90,5 a	93,1 a	18,6 b	111,7 a
	UC	5,4 a	4,5 a	9,8 a	55,6 a	22,3 a	77,9 a	77,6 a	15,5 b	93,0 a	89,1 a	16,3 b	105,4 a
150	UR 1	4,4 a	4,4 a	8,8 a	51,5 a	14,3 a	65,8 a	88,8 a	20,6 a	101,4 a	89,9 a	27,6 a	117,5 a
	UR 2	3,6 a	5,0 a	8,7 a	46,7 a	17,1 a	63,8 a	88,7 a	20,8 a	109,5 a	112,9 a	27,3 a	140,3 a
	UR 3	4,0 a	3,9 a	7,9 ab	60,8 a	13,4 a	74,2 a	93,5 a	25,6 a	119,2 a	112,5 a	28,6 a	141,1 a
	UC	4,9 a	5,0 a	9,9 a	59,3 a	14,6 a	73,9 a	85,2 a	28,2 a	113,4 a	110,4 a	28,1 a	138,5 a
200	UR 1	4,2 a	5,0 a	9,2 a	58,9 a	22,9 a	79,8 a	89,4 a	22,9 a	112,7 a	113,7 a	28,9 a	142,7 a
	UR 2	3,8 a	3,4 a	7,2 ab	55,2 a	14,1 b	69,4 a	95,9 a	27,9 a	123,9 a	107,2 a	31,6 a	138,8 a
	UR 3	4,1 a	4,7 a	8,9 a	62,2 a	19,4 ab	81,7 a	94,1 a	28,6 a	122,7 a	120,7 a	31,4 a	152,1 a
	UC	4,0 a	3,4 a	7,4 ab	59,3 a	21,8 ab	81,0 a	99,7 a	24,5 a	124,3 a	113,4 a	32,5 a	145,9 a
Controle	-	1,4 c	2,3 a	3,7 b	3,9 c	1,6 c	5,4 c	5,9 b	4,2 b	10,1 b	7,4 b	2,9 b	10,3 b
Média das doses													
	UR 1	4,2 a	4,8 a	9,0 ab	46,6 b	13,8 a	59,5 b	69,1 c	17,4 a	86,6 c	81,5 b	22,8 a	104,3 b
	UR 2	3,4 a	4,2 a	7,6 b	41,2 b	12,3 a	53,5 b	71,9 bc	18,5 a	90,4 bc	86,8 ab	23,1 a	109,8 ab
	UR 3	4,6 a	4,8 a	9,4 a	54,8 a	15,1 a	69,9 a	78,7 ab	20,9 a	99,7 ab	96,6 a	22,3 a	118,9 a
	UC	4,8 a	4,6 a	9,4 a	53,5 a	16,8 a	70,4 a	79,3 a	22,5 a	101,8 a	91,8 a	22,1 a	113,9 a
	p <	0,05	NS	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	NS	0,01	0,01	NS	0,05
	CV (%)	17,5	31,2	20,8	12,4	32,4	13,8	11,1	32,4	12,8	12,5	34,2	13,0

Médias com as mesmas letras nas colunas dentro de cada dose de N comparado ao controle, e para o conjunto de médias das doses, não diferem estatisticamente (p < 5% ou 1% de probabilidade). §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

O comportamento apresentado por UR1 e UR2 durante todo o ciclo da cultura, sugere que apesar de UR2 ter demonstrado a característica pretendida de lenta liberação do N-fertilizante, esta não ocorreu de maneira gradual ou controlada, visto que durante os períodos iniciais de desenvolvimento da cultura ocorreu menor disponibilidade do nutriente ao milho, e ao final do ciclo, a fonte se equiparou às demais, enquanto UR1 evidenciou liberação mais gradativa ou controlada de N. Possivelmente, o menor controle na taxa de liberação de N em UR2, seja devido a menor estabilidade do polímero de recobrimento deste em relação a UR1, sendo portanto mais susceptível as mudanças na temperatura e no conteúdo de água do solo, uma vez que esses fatores podem aumentar a permeabilidade destes compostos, aumentando, por sua vez, a taxa de difusão dos nutrientes neles presentes (CHITOLINA, 1994). A variação de temperatura e umidade do solo durante o período experimental pode ter danificado o recobrimento dos grânulos de ureia, o que segundo Huett e Gogel (2000), favorece a rápida liberação dos nutrientes desses fertilizantes.

Aos 35 DAS, a análise estatística mostrou que para a fitomassa de raízes não houve interações entre fontes e doses, assim como a média das fontes não diferiram entre si e do controle. Aos 59 DAS (2ª avaliação) apesar de não ter sido verificada diferença nas médias das fontes, foi observada interação destas com as menores doses de N empregadas (50 e 100 mg dm⁻³), sendo que para a dose de 50 mg dm⁻³ o tratamento UR2 não diferiu do controle, e para a dose de 100 mg dm⁻³ UC foi superior aos demais tratamentos. Durante as avaliações seguintes também não foram encontradas diferenças entre as fontes testadas, sendo estas superiores ao controle, embora nas menores doses (50 e 100 mg dm⁻³), os tratamentos não tenham diferido entre si. Os resultados observados a partir da 2ª avaliação deveram-se ao sistema radicular das plantas estarem diretamente relacionado com a disponibilidade e absorção de N (EDWARDS; BARBER, 1976; JENKINSON; FOX; RAINER, 1985; RAIJ, 1991; MAJEROWICZ et., 2002) sendo, portanto, seu crescimento restringido pelo emprego de baixas doses.

Houve efeito de doses de N no acúmulo de massa seca total das plantas de milho, para todas as fontes testadas, sendo observada para a média das fontes, resposta quadrática ao aumento das doses de N empregadas, com exceção da 1ª avaliação (35 DAS), em que não foi verificado efeito devido, provavelmente, ao baixo requerimento do nutriente durante o período inicial de desenvolvimento da cultura (Figura 2). Estes resultados evidenciam a estreita relação do crescimento das plantas de milho com o suprimento de N, como já mencionado por Duete (2000), corroborando com resultados da literatura em que são relatadas respostas crescentes relacionadas ao acúmulo de massa seca pela cultura, em função de doses

elevadas de N (REDDY; REDDY, 1993; AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; ARAUJO; FERREIRA; CRUZ, 2004).

Figura 2 – Acúmulo de massa seca pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, em função das doses empregadas (média das fontes testadas) nos quatro períodos de avaliação

4.2 Nitrogênio acumulado pelo milho em função da adubação nitrogenada

Analisando o acúmulo de nitrogênio total expresso em mg planta^{-1} (Tabela 3), observou-se interação para doses e fontes na avaliação aos 35 DAS, sendo que nas doses correspondentes a 50 e 100 mg dm^{-3} de N, o N acumulado no tratamento UR2 não diferiu do controle e foi inferior aos tratamentos UR3 e UC, tanto na parte aérea quanto para planta toda de milho. Na média das doses, UR2 também foi inferior aos tratamentos UR3 e UC, reforçando a hipótese de que a taxa de liberação do N-fertilizante deste produto é baixa no período inicial de desenvolvimento da cultura, dos 17 aos 35 DAS, sendo este efeito mais acentuado para as menores doses empregadas, como discutido no acúmulo de fitomassa do milho.

Tabela 3 – Nitrogênio total acumulado nos diferentes órgãos das plantas de milho, em função dos tratamentos em quatro épocas

Tratamentos		Dias após o plantio (DAS)											
		35 (1ª avaliação)			59 (2ª avaliação)			68 (3ª avaliação)			86 (4ª avaliação)		
Doses (mg dm ⁻³)	Fontes [§]	P aérea	Raiz	Total	P aérea	Raiz	Total	P aérea	Raiz	Total	P aérea	Raiz	Total
		mg planta ⁻¹			mg planta ⁻¹			mg planta ⁻¹			mg planta ⁻¹		
50	UR 1	88,5 b	43,2 ab	132,0 bc	225,5 a	54,2 a	279,5 ab	260,7ab	50,7 ab	311,0 ab	199,7 a	144,5 a	344,0 a
	UR 2	61,2 bc	34,7 ab	96,0 cd	259,5 a	48,0 a	307,5 ab	291,2a	58,7 ab	349,0 a	193,7 a	76,2 ab	270,2 a
	UR 3	154,7 a	65,5 a	220,5 a	286,5 a	74,2 a	360,7 ab	281,5ab	56,0 ab	337,2 ab	194,2 a	63,5 ab	257,5 a
	UC	123, 2 a	49,5 ab	172,7 ab	292,0 a	53,2 a	345,0 ab	273 ab	87,7 ab	360,7 a	174,7 a	65,0 ab	239,7 ab
100	UR 1	109,5 b	43,5 ab	152,7 b	346,5 a	70,0 a	416,2 a	345,7 a	99,7 ab	445,7 a	305,7 a	90,7 ab	396,2 a
	UR 2	68,7 bc	35,2 ab	104,2 bd	449,5 a	106,7 a	556,2 a	431,0 a	90,7 ab	522,0 a	318,5 a	139,5 ab	457,7 a
	UR 3	178,7 a	58,2 a	236,5 a	511,5 a	83,7 a	595,5 a	441,5 a	78,2 ab	519,7 a	343,0 a	109,0 ab	452,0 a
	UC	178,7 a	62,2 a	241,0 a	576,7 a	136,0 a	713,0 a	486,7 a	79,5 ab	566,5 a	308,5 a	101,5 ab	409,7 a
150	UR 1	135,5 b	40,7 ab	175,7 b	528,5 a	116,7 a	645,0 a	612,2 a	106,5 a	718,2 a	408,5 a	168,2 a	576,5 a
	UR 2	98,2 b	53,5 a	151,5 b	623,7 a	148,0 a	772,0 a	649,7 a	128,5 a	778,2 a	440,5 a	163,2 a	603,5 a
	UR 3	138,7 ab	57,5 a	196,0 ab	723,2 a	108,0 a	831,2 a	610,2 a	129,2 a	739,0 a	409,2 a	151,0 a	560,2 a
	UC	183,2 a	67,0 a	249,7 a	641,2 a	107,2 a	749,5 a	546,0 a	146,0 a	691,5 a	468,0 a	163,0 a	631,0 a
200	UR 1	148,0 a	59,2 a	207, 0 a	609,2 b	200,2 a	809,5 a	625,2 a	132,7 a	758,0 a	565,2 a	196,5 a	761,5 a
	UR 2	109,2 a	31,2 ab	140,7 b	829,5 ab	138,0 a	967,7 a	785,2 a	186,2 a	971,0 a	655,2 a	209,2 a	864,5 a
	UR 3	153,7 a	56,5 a	210,5 a	932,5 a	153,5 a	1085,7 a	532,5 a	157,2 a	689,7 a	577,5 a	186,5 a	763,7 a
	UC	150,0 a	45,7 ab	196,2 ab	907,7 ab	189,7 a	1097,5 a	619,0 a	150,2 a	769,5 a	592,5 a	191,5 a	784,0 a
Controle	-	12,7 c	16,7 b	29,5 d	28,5 c	10,2 b	39,2 b	42,7 b	26,7 b	69,2 b	31,5 b	19,0 b	50,5 b
Média das doses													
	UR 1	120,4 ab	46,7 ab	166,8 ab	427,4 b	110,3 a	537,5 b	461,0 a	97,4 a	558,2 a	369,8 a	150,0 a	519,6 a
	UR 2	84,3 b	38,7 b	123,1 b	540,6 a	110,2 a	650,8 ab	539,3 a	116,0 a	655,2 a	402,0 a	147,1 a	549,0 a
	UR 3	156,4 a	59,4 a	215,9 a	613,5 a	104,8 a	718,3 a	466,4 a	105,2 a	571,4 a	381,0 a	127,5 a	508,4 a
	UC	158,8 a	56,1 a	214,9 a	604,4 a	121,5 a	726,1 a	481,2 a	115,9 a	597,1 a	385,9 a	130,2 a	516,1 a
	p <	0,01	0,05	0,01	0,01	NS	0,01	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	CV (%)	19,9	29,5	18,6	22,6	33,4	21,1	20,9	28,9	19,1	14,1	36,3	15,1

Médias com as mesmas letras nas colunas dentro de cada dose de N comparado ao controle, e para o conjunto de médias das doses, não diferem estatisticamente ($p < 5\%$ ou 1% de probabilidade). §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Aos 59 DAS (2ª avaliação), na planta toda, a média do N acumulado das doses de UR1 foi inferior aos tratamentos UR3 e UC, não diferindo de UR2; entretanto se considerado apenas a parte aérea das plantas de milho, o tratamento UR1 foi inferior a todos os demais tratamentos, devido provavelmente à liberação gradativa de N que este produto apresentou em relação aos demais.

Nas 3ª e 4ª avaliações (68 e 86 DAS), para a média das doses, não foram verificadas diferenças entre as fontes testadas, ocorrendo equiparação nos valores de N acumulado nos tratamentos com os produtos de lenta e de pronta liberação de N. Estes resultados são concordantes com o encontrado por Nelson, Paniagua e Motavalli (2009), que verificaram pouca diferença no acúmulo e absorção de N pelas plantas de milho quando testada ureia de lenta liberação em comparação a ureia fertilizante convencional.

De acordo com Cantarella (1993), a absorção de N pelas plantas de milho é mais intensa no período de 40 a 60 dias após a emergência, correspondendo à exigência de cerca de 50% do N requerido pela cultura, sendo que o restante pode ser absorvido após o início do florescimento, podendo-se inferir a respeito, que apesar de os produtos de lenta liberação não disponibilizarem todo o N necessário durante o período inicial da cultura, estes ainda continuam disponibilizando nutriente nos estádios mais avançados, se equiparando com os demais tratamentos ao final do ciclo do milho.

Foi verificado efeito das doses no acúmulo de N pelo milho, sendo que para a 1ª avaliação, houve interação com as fontes testadas (Figura 3). Observa-se que nos tratamentos com os produtos de lenta liberação (UR1 e UR2) o acúmulo de N respondeu linearmente ao aumento das doses empregadas, de forma semelhante ao observado por Malhi et al (2003), que obtiveram para a cultura de trigo e canola, aumento significativo na absorção de N pelas plantas com o aumento das doses empregadas nos tratamentos em que foi testada ureia revestida com polímero de lenta liberação. O tratamento UR3 apresentou decréscimo no acúmulo de N em função do aumento de doses, que deveu-se, provavelmente, a algum erro amostral, evidenciado pela baixa correlação ($R^2 = 0,28$).

Para o tratamento UC foi observado comportamento quadrático em resposta ao incremento das doses de N-fertilizante, com decréscimo no acúmulo de N para as doses 150 e 200 mg dm⁻³. Este resultado pode ser devido a maior disponibilidade de N no tratamento UC, durante o período em que a absorção do nutriente pelas plantas ainda não é intensa, favorecendo as perdas de N do sistema, sendo este processo mais acentuado para as maiores doses de N. Estes resultados estão de acordo com os descritos por Silva et al (2005) e Gomes

et al (2007) que observaram o máximo acúmulo de N nas folhas da cultura do milho nas doses de 145 e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Figura 3 – Nitrogênio total acumulado pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, em função das doses empregadas no período correspondente a 1ª avaliação. UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional

No período experimental (2ª, 3ª e 4ª avaliações), foi observado para a média das fontes, incremento no acúmulo de N pelas plantas em resposta ao aumento das doses empregadas (Figura 4). Dos resultados da Tabela 3, pode-se ainda observar, que nas condições do presente estudo, a quantidade máxima de nitrogênio total acumulado pela cultura ocorreu no período de aproximadamente 60 dias após a semeadura, sendo verificado nas avaliações posteriores, decréscimo nos valores de N acumulado pelas plantas.

Figura 4 – Nitrogênio total acumulado pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, em função das doses empregadas (média das fontes testadas) nos períodos correspondente a 2^a, 3^a e 4^a avaliações

O decréscimo no N acumulado nas plantas de milho nas 3^a e 4^a avaliações, deveu-se as plantas terem iniciado seu período de maturidade fisiológica, a partir do qual ocorre declínio no conteúdo de N das mesmas (MORGAN; PARTON, 1989; FRANCIS; SCHEPERS; VIGIL, 1993; HOLTAN-HARTWING; BOCKMAN, 1994), causado por perdas de N pela parte aérea (JENKINSON; FOX; RAINER, 1985). Segundo Francis, Schepers e Vigil (1993), durante os estádios reprodutivos da cultura do milho, as mudanças no metabolismo do nitrogênio da planta e também por meio da quebra de proteínas e aminoácidos, resultam em um aumento na concentração interna de NH_4^+ e NH_3 . Como em altas concentrações o NH_4^+ é tóxico as plantas, o excesso deste elemento pode ser liberado na forma de NH_3 pelos estômatos (MATTSSON; HUTSON; SCHJOERRING, 1998). As perdas ocorridas durante o período reprodutivo da cultura podem chegar a 20% do total de N-fertilizante aplicado, sendo esta, maior entre os estádios de início do enchimento de grãos e grãos maduros (FRANCIS; SCHEPERS; VIGIL, 1993). O ambiente restrito para o desenvolvimento radicular das plantas, pode ainda ter acarretado maior stress a cultura aumentando as perdas de N pela parte aérea.

4.3 Nitrogênio mineral no solo (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) em função da adubação nitrogenada

Devido a grande variação nos valores obtidos para o teor de N mineral do solo (N-NO_3^- e N-NH_4^+), estes não foram submetidos a análise de variância por não apresentarem normalidade (5% de significância). Estas variações podem ter ocorrido tanto pelos erros experimentais, quanto ao dinamismo do N do solo, que devido sua constante transformação dificulta a avaliação de sua disponibilidade (SANTOS, 2008). São apresentados na Tabela 4, somente, as médias e o erro padrão das mesmas.

Na 1ª avaliação (35 DAS) foi observado tanto para o N-NO_3^- quanto para o N-NH_4^+ , menor teor destes no solo para os tratamentos UR1 e UR2 em relação a UR3 e UC, fato este, atribuído as características de lenta liberação de UR1 e UR2, propiciado pelo polímero de recobrimento, enquanto a ureia nos tratamentos UR3 e UC esteve prontamente disponível para hidrólise no solo, e posterior formação de amônio e nitrato. Este resultado corrobora com o apresentado por Wilson, Rosen e Moncrief (2009) que observaram em estudo realizado com a cultura da batata em solo arenoso, menor teor de N-NO_3^- nas amostras de solo do tratamento onde foi utilizada ureia recoberta por polímero de lenta liberação em relação ao tratamento com N solúvel.

No decorrer do período experimental (2ª, 3ª e 4ª avaliações) os teores de N-NO_3^- e N-NH_4^+ no solo, foram maiores para UR1 e UR2 evidenciando as características de lenta liberação destes quando comparados a UR3 e UC. Esse comportamento está de acordo com observações de Nelson, Paniagua e Motavalli (2009) que compararam também para a cultura do milho, o uso de ureia recoberta com polímero de lenta liberação e ureia fertilizante convencional, sendo observado aos 59 dias após a aplicação do fertilizante, menores teores de N-nitrato no solo para ureia de lenta liberação em relação a ureia fertilizante convencional; entretanto, aos 152 dias os teores de N-nitrato foram de 85 a 92% maiores no tratamento com ureia revestida com polímero.

Tabela 4 – Teores de N-NO_3^- e N-NH_4^+ no solo em função dos tratamentos, em quatro épocas

Fontes [§]	1ª Avaliação (35 DAS)		2ª Avaliação (59 DAS)		3ª Avaliação (68 DAS)		4ª Avaliação (86 DAS)	
	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+
Controle	0,04 ± 0,04	4,1 ± 0,9	0,00 ± 0,00	1,6 ± 0,7	0,00 ± 0,00	3,0 ± 0,8	0,9 ± 0,3	0,0 ± 0,0
UR 1	25,5 ± 4,9	101,8 ± 21,3	2,8 ± 0,7	5,3 ± 1,9	0,8 ± 0,5	12,0 ± 4,1	1,2 ± 0,7	11,7 ± 4,3
UR 2	20,6 ± 4,0	199,7 ± 64,3	9,6 ± 3,5	15,7 ± 6,5	0,4 ± 0,2	8,7 ± 2,5	0,5 ± 0,3	16,5 ± 12,1
UR 3	59,6 ± 6,9	264,6 ± 54,3	1,1 ± 0,4	3,0 ± 0,9	0,5 ± 0,2	2,2 ± 0,4	0,1 ± 0,1	1,4 ± 0,6
UC	47,0 ± 5,8	227,7 ± 47,7	2,8 ± 0,5	1,9 ± 0,5	0,3 ± 0,2	1,8 ± 0,3	0,2 ± 0,1	1,6 ± 0,7
Doses (mg dm⁻³)								
50	14,9 ± 2,9	13,0 ± 2,5	1,3 ± 0,6	2,1 ± 0,5	0,5 ± 0,2	1,8 ± 0,4	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,1
100	31,8 ± 4,6	122,8 ± 17,7	2,9 ± 0,7	3,0 ± 1,4	0,9 ± 0,5	6,6 ± 2,1	0,3 ± 0,2	2,9 ± 1,4
150	45,1 ± 7,4	226,7 ± 36,6	2,8 ± 0,8	6,1 ± 2,2	0,3 ± 0,2	3,8 ± 1,1	0,1 ± 0,1	1,7 ± 1,4
200	61,0 ± 5,3	431,3 ± 52,8	9,1 ± 3,5	14,8 ± 6,4	0,2 ± 0,2	12,4 ± 4,2	1,6 ± 0,7	26,5 ± 11,9

Média ± erro padrão da média. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

De maneira geral, durante todo o ciclo da cultura, em todos os tratamentos, os teores de N-NH_4^+ do solo foram sempre superiores aos de N-NO_3^- . Estes resultados podem em parte ser explicados pelo experimento ter sido conduzido em vasos e, portanto em um volume restrito de solo, e durante curto período de tempo, o que pode ter limitado o processo de nitrificação do N-NH_4^+ pelos microrganismos do solo. O menor teor de N-NO_3^- pode ter sido ainda acentuado pelo fato de as plantas de milho utilizarem preferencialmente o íon NO_3^- nos estádios finais da cultura, reduzindo sua quantidade em relação ao íon NH_4^+ , forma esta que é absorvido preferencialmente durante o período inicial de desenvolvimento das plantas (WARNCKE; BARBER, 1973; YAMADA; ABDALLA, 2000), quando o NH_4^+ apresentava-se em elevado teor no solo, restando, portanto, pouco deste elemento para que ocorra o processo de nitrificação. Pode-se notar também, que não houve incremento nos teores de N-NO_3^- ao longo do período experimental, reforçando as hipóteses levantadas anteriormente, já que a nitrificação pode ser considerada responsável pela maior parte do destino do N-NH_4^+ do solo (ROBERTSON, 1997; BURGER; JACKSON, 2003).

Em dados não apresentados, foi verificado que durante o período inicial de desenvolvimento da cultura, o nitrogênio total do solo (N total) variou de 2031 mg vaso⁻¹ no tratamento testemunha a 2723 mg vaso⁻¹ na média dos tratamentos em que foram empregadas as maiores doses, sendo que ao final do período experimental esses valores foram de 2738 e 2521 mg vaso⁻¹ para testemunha e média dos tratamentos de maior dose respectivamente. Os maiores valores de N total observados para os tratamentos adubados em relação à testemunha durante o desenvolvimento inicial da cultura, deveu-se ao requerimento de N pelas plantas ainda não ser suficiente para absorção de todo o N disponibilizado, principalmente para as maiores doses testadas, sendo essa diferença inexistente ao final do período experimental, quando todo o N disponível no solo foi utilizado pela cultura. Deve-se também considerar a variação nos valores obtidos para o parâmetro avaliado, sendo esta devido à amostragem do solo que pode não ter sido representativa se considerarmos que todo o adubo foi aplicado de maneira localizada, dificultando a homogeneização do solo para sua posterior amostragem.

Foi verificado um incremento nos teores de N-NO_3^- e N-NH_4^+ do solo proporcional ao aumento das doses de N-fertilizante, corroborando com dados da literatura que apontam aumento no N mineral do solo em função da adição de N ao sistema (BARABASZ et al., 2002; RIEDELL, et al., 2009; LU et al., 2010). Observou-se que o aumento nos teores de N mineral do solo são mais acentuados durante o período correspondente a 1ª avaliação (35 DAS), onde a absorção do nutriente pelas plantas ainda é baixo. Os resultados observados estão de acordo com estudo realizado por Lu et al. (2010) em que foi verificado incremento

nos teores de N-NO_3^- e N-NH_4^+ do solo quando a dose nominal de N aplicada passou de 0 para 100 e 200 kg ha^{-1} . Os autores do trabalho também obtiveram decréscimo nos teores de N mineral do solo ao longo do período experimental, como também observado no presente estudo, sendo este fato devido ao aumento da absorção de N pela cultura do milho ao decorrer de seu ciclo de crescimento, esgotando o estoque de nutrientes do recipiente ao qual as plantas foram acondicionadas.

4.4 Recuperação pelas plantas do N-ureia avaliado pela técnica de variação natural de ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$)

A recuperação do N da ureia das diferentes fontes pela técnica isotópica, considerada a parte aérea das plantas de milho e planta toda, não possibilitou a estimativa do N na planta proveniente do fertilizante, apresentando grande variação nos valores de recuperação (R%), sendo a variação maior para Ureia 3 e 4 (UR3 e UC) (Tabelas 5 e 6). A inconsistência nos valores de R% deveu-se, principalmente, aos valores de $\delta^{15}\text{N}$ que variaram de -6,65 a +7,55‰ para parte aérea das plantas e de -5,85 a +6,82‰ para planta toda, extrapolando os valores médios de $\delta^{15}\text{N}$ da ureia e da planta teste que foram de -0,65 e +4,2‰ respectivamente.

Tabela 5 - $\delta^{15}\text{N}$ e R% pela parte aérea das plantas de milho, em função dos tratamentos em quatro épocas

Fontes [§]	1ª Avaliação (35 DAS)		2ª Avaliação (59 DAS)		3ª Avaliação (68 DAS)		4ª Avaliação (86 DAS)	
	$\delta^{15}\text{N}$	R (%)	$\delta^{15}\text{N}$	R (%)	$\delta^{15}\text{N}$	R (%)	$\delta^{15}\text{N}$	R (%)
UR 1	$-2,23 \pm 0,73$	$19,08 \pm 1,36$	$+1,55 \pm 0,16$	$28,99 \pm 2,67$	$+1,68 \pm 0,19$	$30,12 \pm 3,16$	$+1,92 \pm 0,13$	$23,24 \pm 1,81$
UR 2	$-1,79 \pm 1,16$	$12,10 \pm 2,33$	$+0,82 \pm 0,23$	$44,19 \pm 4,53$	$+1,34 \pm 0,35$	$39,50 \pm 5,51$	$+1,26 \pm 0,14$	$29,53 \pm 2,18$
UR 3	$-5,67 \pm 0,94$	$39,07 \pm 4,03$	$+6,06 \pm 0,52$	$-24,32 \pm 6,77$	$+5,91 \pm 0,36$	$-17,12 \pm 3,79$	$+4,85 \pm 0,31$	$-1,16 \pm 2,94$
UC	$-3,35 \pm 0,99$	$30,25 \pm 2,92$	$+6,44 \pm 0,49$	$-33,22 \pm 7,53$	$+7,55 \pm 0,95$	$-41,12 \pm 10,40$	$+6,06 \pm 0,36$	$-12,88 \pm 3,22$
Doses (mg dm⁻³)								
50	$0,46 \pm 0,44$	$25,00 \pm 4,96$	$+2,71 \pm 0,58$	$22,69 \pm 8,62$	$+3,01 \pm 0,55$	$18,31 \pm 9,25$	$+3,37 \pm 0,54$	$13,99 \pm 5,64$
100	$-1,95 \pm 0,65$	$26,98 \pm 4,48$	$+3,78 \pm 0,80$	$-1,51 \pm 11,85$	$+3,61 \pm 0,71$	$5,25 \pm 8,90$	$+3,50 \pm 0,62$	$9,37 \pm 5,32$
150	$-4,90 \pm 1,04$	$25,93 \pm 3,41$	$+4,45 \pm 0,83$	$-5,14 \pm 10,07$	$+5,65 \pm 1,24$	$-15,20 \pm 14,36$	$+3,96 \pm 0,59$	$4,14 \pm 4,94$
200	$-6,65 \pm 0,81$	$22,59 \pm 1,87$	$+3,93 \pm 0,74$	$-0,40 \pm 8,77$	$+4,21 \pm 0,71$	$3,01 \pm 6,95$	$+3,26 \pm 0,52$	$11,23 \pm 4,41$

Média $\pm$ erro padrão da média. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Tabela 6 - $\delta^{15}\text{N}$ e R% pela planta toda de milho (parte aérea + sistema radicular), em função dos tratamentos em quatro épocas

Fontes [§]	1ª Avaliação (35 DAS)		2ª Avaliação (59 DAS)		3ª Avaliação (68 DAS)		4ª Avaliação (86 DAS)	
	$\delta^{15}\text{N}$	R (%)	$\delta^{15}\text{N}$	R (%)	$\delta^{15}\text{N}$	R (%)	$\delta^{15}\text{N}$	R (%)
UR 1	$-1,88 \pm 0,68$	$25,09 \pm 1,46$	$+1,28 \pm 0,14$	$39,24 \pm 3,28$	$+1,45 \pm 0,18$	$39,52 \pm 3,87$	$+1,81 \pm 0,12$	$32,78 \pm 2,96$
UR 2	$-1,52 \pm 1,00$	$16,99 \pm 2,93$	$+0,70 \pm 0,22$	$54,67 \pm 5,08$	$+1,19 \pm 0,33$	$49,51 \pm 6,46$	$+1,25 \pm 0,14$	$39,18 \pm 2,32$
UR 3	$-4,76 \pm 0,85$	$49,98 \pm 5,22$	$+5,65 \pm 0,50$	$-23,37 \pm 8,35$	$+5,48 \pm 0,33$	$-16,59 \pm 4,70$	$+4,59 \pm 0,26$	$-2,71 \pm 3,39$
UC	$-2,69 \pm 0,89$	$37,76 \pm 3,31$	$+6,01 \pm 0,45$	$-34,29 \pm 8,49$	$+6,82 \pm 0,77$	$-41,40 \pm 11,47$	$+5,50 \pm 0,32$	$-15,27 \pm 4,09$
Doses (mg dm⁻³)								
50	$+0,62 \pm 0,37$	$33,01 \pm 6,11$	$+2,49 \pm 0,54$	$30,76 \pm 9,84$	$+2,79 \pm 0,51$	$25,73 \pm 10,53$	$+3,26 \pm 0,46$	$18,55 \pm 7,61$
100	$-1,54 \pm 0,57$	$34,01 \pm 5,27$	$+3,40 \pm 0,74$	$3,91 \pm 13,40$	$+3,34 \pm 0,70$	$10,65 \pm 10,64$	$+3,24 \pm 0,56$	$13,25 \pm 6,80$
150	$-4,08 \pm 0,92$	$33,55 \pm 4,40$	$+4,05 \pm 0,80$	$-0,57 \pm 11,99$	$+4,94 \pm 1,05$	$-11,44 \pm 15,87$	$+3,56 \pm 0,54$	$7,56 \pm 6,37$
200	$-5,85 \pm 0,69$	$29,26 \pm 2,34$	$+3,69 \pm 0,72$	$2,15 \pm 10,52$	$+3,87 \pm 0,67$	$6,10 \pm 8,45$	$+3,09 \pm 0,50$	$14,62 \pm 5,90$

Média $\pm$ erro padrão da média. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

A variação obtida nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ nas partes da planta pode ser atribuída ao fracionamento isotópico ocorrido durante as reações de transformações do N no solo. Dentre os produtos analisados o $\delta^{15}\text{N}$ variou mais negativamente para as ureias de pronta disponibilidade (UR3 e UC) em relação aos produtos de lenta liberação de N (UR1 e UR2), sendo ainda observado valores mais negativos com o aumento das doses, principalmente na primeira avaliação (35 DAS). A explicação para os resultados observados é a ocorrência de fracionamento isotópico (alteração na razão $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ entre substrato e produto causada pelos processos químicos, físicos e biológicos) nas reações que se passam no solo como: hidrólise da ureia; difusão desta através dos produtos com recobrimento e do ponto de aplicação do fertilizante até às raízes; na nitrificação do NH_4^+ produto da hidrólise da ureia; na volatilização de NH_3 do solo à atmosfera, na desnitrificação que pode ocorrer em microssítios anaeróbios no solo, assim como na absorção do N derivado do fertilizante (NH_4^+ e/ou NO_3^-) pelas plantas. Assim sendo, o fracionamento isotópico integrado causado por esses mecanismos do ciclo do N, resultou em menores variações nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ nas plantas, com as menores doses, já que sob condições limitantes de N, esperava-se que a planta utilizasse todo o N disponível, justificando dessa maneira a menor variação isotópica para os valores de $\delta^{15}\text{N}$ nos tratamentos com produtos de lenta liberação de N (UR1 e UR2), já que a menor taxa de difusão proporcionada pelos polímeros de recobrimento pode retardar as transformações do N no solo.

Segundo Yoneyama et al. (1991) durante a absorção de amônia pelas plantas pode ocorrer discriminação isotópica, podendo as plantas apresentarem valores negativos de $\delta^{15}\text{N}$ relativamente a fonte de N, devido à relativa maior absorção do isótopo mais leve do elemento (^{14}N) em relação ao pesado (^{15}N).

Os maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ encontrados nas avaliações mais tardias, deveram-se provavelmente ao N na solução do solo (substrato das plantas) ter-se enriquecido no isótopo ^{15}N , com o tempo, devido à discriminação isotópica deste em relação ao ^{14}N nas várias transformações do N até o nutriente ser absorvido pelas plantas. No decorrer do tempo, também pode ter havido variabilidade temporal da forma isotópica absorvida pela planta. Mariotti et al. (1981) relatam que em plantas de azevém os valores observados de $\delta^{15}\text{N}$ foram de -6,3‰ aos 23 dias e de -1,9‰ aos 65 dias. Do mesmo modo, devido ao maior período de contato entre os microrganismos e o N disponível no solo, maior parte deste pode ter sofrido o processo de nitrificação, resultando em menor variação no $\delta^{15}\text{N}$ da planta, já que o íon NO_3^- é geralmente menos discriminado isotopicamente durante a sua absorção. Yoneyama e Kaneko (1989) e Yoneyama et al. (1991) observaram que durante o processo de assimilação do nitrato

pelas plantas, estas apresentam baixo fracionamento para este composto, resultando em valores de $\delta^{15}\text{N}$ na planta próximos aos da fonte aplicada.

Outra hipótese que pode explicar as variações no $\delta^{15}\text{N}$ da planta seria que durante as regas do solo tenha ocorrido o descobrimento das fontes utilizadas, tornando-as susceptível ao processo de volatilização de amônia. Segundo Yoneyama et al. (1991) durante esse processo pode ocorrer em maior proporção a volatilização do íon $^{14}\text{NH}_3$ em relação ao seu isótopo mais pesado, aumentando o valor de $\delta^{15}\text{N}$ na solução do solo. Dessa maneira no decorrer do ciclo da planta, esta pode absorver formas mais enriquecidas de ^{15}N , justificando os maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ nas avaliações mais tardias, e também os menores valores para os produtos de lenta liberação, já que estes estariam menos susceptíveis ao processo de volatilização de amônia.

Durante o período experimental também pode ter ocorrido o enriquecimento do substrato devido ao processo de desnitrificação, no qual ocorre a emissão de formas gasosas como N_2 e N_2O (ROBERTSON; GROFFMAN, 2007). Em estudos realizados por Delwiche e Steyn (1970) os autores mencionaram que esses gases são preferencialmente emitidos na forma de $^{14}\text{N}_2\text{O}$ e $^{14}\text{N}_2$ e, portanto, há a retenção de ^{15}N no solo. O fracionamento isotópico pode ainda ter ocorrido pelo processo de fixação do N_2 atmosférico, onde há a discriminação isotópica pelas bactérias fixadoras do solo, que fazem maior utilização do ^{14}N em relação ao ^{15}N , deixando o $\delta^{15}\text{N}$ do solo levemente empobrecido no isótopo pesado de N quando comparado ao $\delta^{15}\text{N}$ atmosférico (DELWICHE; STEYN, 1970).

Coque et al. (2006) sugeriram que as diferenças isotópicas apresentadas pelas plantas podem ser também devido a fatores genéticos. Os autores por meio de estudo em que foi utilizado um conjunto de 99 híbridos recombinantes de milho observaram que houve uma variação genética na habilidade das plantas de milho em discriminar os isótopos ^{14}N e ^{15}N . Entretanto segundo os autores, a discriminação isotópica deve-se muito provavelmente a dois mecanismos, sendo eles: diferenças morfo-fisiológicas entre os híbridos, principalmente em relação ao sistema radicular, que pode ser mais profundo e absorver mais N proveniente do solo, ou mais superficial e absorver o N proveniente do fertilizante, alterando o conteúdo de ^{15}N nas plantas; o outro mecanismo deve-se a diferença na atividade enzimática das plantas, afetando as enzimas envolvidas no metabolismo do nitrogênio na planta, como as nitrato e nitrito redutase e a glutamina sintetase, de tal maneira que os genótipos mais eficientes seriam também os que causariam maior discriminação isotópica.

Pode-se observar que os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo foram maiores no período correspondente a primeira avaliação (Tabela 7), coincidindo com o período em que foram encontrados valores negativos pela parte aérea da cultura, reforçando a ideia de que

inicialmente tenha havido discriminação isotópica na absorção de N pelas plantas, podendo estas terem absorvido a forma mais leve do elemento nitrogênio (^{14}N) em relação ao ^{15}N (MARIOTTI et al., 1981; YONEYAMA et al., 1991), enriquecendo dessa maneira o solo. Pode-se ainda observar valores mais acentuados para os tratamentos em que foram utilizadas fontes de rápida disponibilização de N para o sistema solo-planta (Ureia 3 e 4), aumentando a susceptibilidade deste elemento às perdas gasosas, podendo refletir no enriquecimento do solo (GUBSCH et al., 2011), quando comparado com as fontes de lenta liberação de N.

Tabela 7 – Valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo, em função dos tratamentos em quatro épocas

Fontes [§]	$\delta^{15}\text{N}$			
	1ª Avaliação (35 DAS)	2ª Avaliação (59 DAS)	3ª Avaliação (68 DAS)	4ª Avaliação (86 DAS)
UR 1	+7,43 ± 0,39	+5,66 ± 0,15	+5,69 ± 0,17	+5,38 ± 0,14
UR 2	+7,17 ± 0,42	+5,09 ± 0,32	+5,77 ± 0,11	+5,30 ± 0,15
UR 3	+8,41 ± 0,27	+5,72 ± 0,11	+5,62 ± 0,15	+5,49 ± 0,18
UC	+8,53 ± 0,28	+5,66 ± 0,23	+5,79 ± 0,11	+5,29 ± 0,15
Doses (mg dm⁻³)				
50	+8,02 ± 0,33	+5,49 ± 0,09	+6,11 ± 0,09	+5,13 ± 0,15
100	+7,57 ± 0,36	+5,75 ± 0,37	+5,38 ± 0,10	+5,23 ± 0,13
150	+7,28 ± 0,40	+5,77 ± 0,18	+5,29 ± 0,13	+5,19 ± 0,12
200	+8,66 ± 0,32	+5,12 ± 0,12	+6,09 ± 0,07	+5,91 ± 0,13

Média ± erro padrão da média. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Com o tempo, houve decréscimo nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo, o que também coincidiu com o período em que foram observados maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ na planta, levando a crer que realmente tenha continuado a ocorrer o fracionamento do N por meio dos demais processos já mencionados, e que devido ao volume restrito de solo explorado pelo sistema radicular, este tenha feito uso de todo o N disponível, independentemente de sua forma isotópica, principalmente após a primeira avaliação, quando ocorre o início do período de maior exigência do nutriente pela cultura do milho. Também é possível observar menor variação entre os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo nas avaliações mais tardias, indicando que para este período, a adição do fertilizante mineral ao sistema exerceu pouca influência nos padrões de $\delta^{15}\text{N}$ do solo, como já observado por Chen et al. (2011).

4.5 Recuperação aparente (RA%) do N-ureia pela cultura do milho

Os resultados de recuperação aparente (RA%) do N-Ureia na parte aérea e planta toda de milho apresentaram para a média das doses, diferença dentre as fontes nas 1ª e 2ª avaliações, sendo que para ambas os produtos que apresentaram maiores RA% foram aqueles de pronta liberação de N (UR3 e UC), seguidos pelos produtos recobertos com polímeros para lenta liberação do nutriente (UR1 e UR2) (Tabelas 8 e 9).

Tabela 8 – Recuperação aparente (%) do N-fertilizante (média das doses) pela parte aérea da cultura do milho, em função dos tratamentos em quatro épocas

Fontes [§]	1ª Avaliação (35 DAS)	2ª Avaliação (59 DAS)	3ª Avaliação (68 DAS)	4ª Avaliação (86 DAS)
UR 1	14,2 b	47,7 b	50,4 a	40,3 a
UR 2	9,2 c	60,0 ab	59,3 a	42,7 a
UR 3	21,6 a	68,3 a	53,6 a	41,5 a
UC	20,3 a	68,7 a	54,6 a	40,5 a
P <	0,01	0,01	NS	NS
CV %	27,3	22,8	20,6	18,9

Médias com as mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% ou 1% de probabilidade. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Tabela 9 – Recuperação aparente (%) do N-fertilizante (média das doses) pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, em função dos tratamentos em quatro épocas

Fontes [§]	1ª Avaliação (35 DAS)	2ª Avaliação (59 DAS)	3ª Avaliação (68 DAS)	4ª Avaliação (86 DAS)
UR 1	18,4 b	58,9 b	58,5 a	58,5 a
UR 2	12,3 c	71,6 ab	69,2 a	57,9 a
UR 3	28,2 a	80,4 a	62,3 a	54,0 a
UC	26,0 a	81,7 a	65,9 a	53,2 a
P <	0,01	0,01	NS	NS
CV %	27,9	22,5	19,3	23,6

Médias com as mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% ou 1% de probabilidade. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Na 2ª avaliação, as maiores médias de recuperação do N-fertilizante ocorreram para ureia fertilizante convencional (UC) e Ureia recoberta UR3, com valores médios de 68,5 e 81% para parte aérea e planta toda respectivamente (Tabelas 8 e 9).

Os valores de máxima recuperação apresentados se aproximaram dos resultados verificados por Villas Boas (1995), que relatou para um experimento também realizado em

vasos, para média das doses empregadas, recuperação máxima de 64,1 e 72% pela parte aérea e planta toda respectivamente. Resultados semelhantes também foram descritos por Villas Boas et al. (2005) e Lara Cabezas e Couto (2007), que observaram para a mesma cultura uma recuperação de 67 e 60% do N-fertilizante aplicado na forma de ureia. Estes resultados estão ainda de acordo com Ladha et al. (2005), que relatou média de 65% de recuperação do N-fertilizante, em levantamento feito para diversas regiões do mundo. Entretanto esses valores são superiores aos obtidos em estudos de campo, onde as perdas de N do sistema passam a ter maior representatividade (COELHO et al., 1991; VILLAS BOAS, 1995; LARA CABEZAS et al., 2000; GAVA et al., 2006), além do sistema radicular das plantas de milho poder explorar maior volume de solo comparativamente a experimentos em vaso.

As maiores recuperações médias apresentadas para UR3 e UC nas duas primeiras avaliações, deveram-se ao fato de estas estarem prontamente disponíveis para absorção pelas plantas. Os vegetais podem absorver a ureia como tal ou após sua hidrólise como N-amônio ou N-nítrico (ANTI et al., 2001). Os menores valores de RA% observados para as demais ureias (UR1 e UR2) evidenciam as características de lenta liberação dessas fontes, acarretando em menor disponibilidade e consequente menor absorção de N pela cultura do milho na fase inicial de desenvolvimento. Zhang et al. (2000), em estudo realizado em casa de vegetação visando avaliar o efeito do uso de ureia de lenta liberação no crescimento do sistema radicular de plantas de cevada, observaram que a recuperação do N-ureia no solo durante os períodos iniciais de desenvolvimento da cultura foi maior quando comparada com produto de lenta liberação, no entanto, a recuperação deste no solo foi aumentada com o decorrer do período experimental.

Na 1ª avaliação foi ainda verificada interação para fontes e doses (Tabelas 10 e 11), sendo para os parâmetros avaliados, UR3 e UC superiores a UR1 e UR2 nas doses de 50 e 100 mg dm⁻³, e iguais nas doses de 150 e 200 mg dm⁻³, comportamento esse atribuído ao declínio na recuperação pelas plantas do N-fertilizante nas maiores doses, principalmente para os produtos em que o nutriente encontrava-se prontamente disponível as plantas. O aumento nas doses pode ter acarretado, também, em maior disponibilidade de N dos produtos de lenta liberação, devido ao incremento na concentração deste elemento por unidade experimental, diminuindo a diferença destes em relação a UR3 e UC. De acordo com Chitolina (1994) e Huet e Gogel (2000), a taxa de liberação de nutrientes dos fertilizantes recobertos por polímeros pode ser influenciada pela concentração, estando também diretamente ligada ao conteúdo de água e a temperatura do solo, uma vez que estes podem aumentar a

permeabilidade desses compostos, aumentando por sua vez a taxa de difusão dos nutrientes neles presentes.

Tabela 10 – Interação entre fonte *vs* dose na recuperação aparente (%) do N-ureia avaliada na parte aérea da cultura do milho no período correspondente a 1ª avaliação

Fontes [§]	Doses			
	50	100	150	200
	----- mg dm ⁻³ -----			
UR 1	21,6 c	13,8 b	8,1 a	9,6 a
UR 2	13,8 c	7,9 b	11,6 a	6,9 a
UR 3	40,5 a	23,7 a	11,9 a	10,1 a
UC	31,5 b	23,7 a	16,2 a	9,8 a
P <	0,01	0,01	NS	NS

Médias com as mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% ou 1% de probabilidade. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Tabela 11 – Interação entre fonte *vs* dose na recuperação aparente (%) do N-fertilizante pela planta toda (parte aérea da cultura + sistema radicular) da cultura do milho no período correspondente a 1ª avaliação

Fontes [§]	Doses			
	50	100	150	200
	----- mg dm ⁻³ -----			
UR 1	29,3 c	17,6 b	13,9 a	12,7 a
UR 2	19,0 c	10,6 b	11,6 a	7,9 a
UR 3	54,5 a	29,6 a	14,8 a	12,9 a
UC	40,9 b	30,2 a	20,9 a	11,9 a
P <	0,01	0,01	NS	NS

Médias com as mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% ou 1% de probabilidade. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Na 3ª e 4ª avaliações, não foram observadas diferenças dentre as fontes estudadas, sendo que ao final do ciclo da cultura também não foram observadas diferenças na recuperação do N-ureia dentro de cada dose. Esses resultados estão de acordo com os apresentados por Nelson, Panigua e Motavalli (2009), que obtiveram para experimento de campo poucas diferenças para os parâmetros avaliados na cultura do milho entre a fonte de lenta liberação e ureia comum. Cahill et al. (2007) também não observaram para o milho, vantagens no uso de polímeros de lenta liberação em comparação ao fertilizante convencional.

Entretanto, Bahr, Zeidan e Hozayn (2006) estudando o efeito de ureia de lenta liberação em um solo arenoso no Egito, descreveram que houve resposta significativa à aplicação deste insumo quando comparado à ureia comum, atribuindo estes resultados ao aumento da eficiência no uso do N pelas plantas de milho.

Apesar de os polímeros de recobrimento exercerem a função de lenta liberação do N para a solução do solo até os 59 DAS, principalmente no tratamento UR2, a equiparação dos valores de RA% das fontes nas 3^a e 4^a avaliações sugerem que a ureia após 59 DAS foi totalmente liberada, sendo o N absorvido pelas plantas de milho igualmente nos tratamentos. Wilson, Rosen e Moncrief (2009) em estudo em que foram testadas a aplicação de ureia recoberta com polímero de lenta liberação, durante as fases de pré-plantio, plantio e emergência das plantas, verificaram que em média 90% do N do fertilizante haviam sido liberados no solo no período de 86 a 104 dias após o plantio. Taxas ainda mais precoces de liberação do N-fertilizante foram encontradas por Golden et al. (2009) e Cahill et al. (2007), verificando que o tempo de liberação de N por esses insumos foram de aproximadamente 40 e 14 dias respectivamente. Ao final do ciclo da cultura, pelo fato de os valores de RA% não terem diferido dentre as fontes utilizadas em cada dose, pode-se concluir para nas condições do experimento que não se justifica a redução da dose para os produtos de lenta liberação de N.

No período experimental foi ainda observado decréscimo nos valores de RA% do N-fertilizante (Figura 5). Este fato deveu-se a recuperação aparente ser calculada pela diferença entre o N acumulado nas plantas de um tratamento com ureia e o controle, dividindo-se pela dose de fertilizante. O decréscimo é justificado pelo estreitamento dessa relação devido à redução no N-acumulado nas plantas com decorrer do ciclo, como discutido em 4.2.

Figura 5 – Recuperação Aparente (%) do N-fertilizante pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, para cada dose, avaliada aos 86 DAS. UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional

4.6 Eficiência no uso do N-ureia pela cultura do milho

4.6.1 Eficiência fisiológica (EF)

Ao final do ciclo da cultura, os produtos de pronta liberação de N (UR3 e UC) apresentaram na dose de 50 mg dm⁻³ a maior eficiência fisiológica (EF) no uso do N aplicado (média de 327,7 kg kg⁻¹) para parte aérea da cultura, seguidos dos produtos de lenta liberação de N, UR2 e UR1 respectivamente (Tabela 12). Na planta toda, para a mesma dose (Tabela 13), UR3 e UC continuaram superiores para o parâmetro avaliado (293,6 kg kg⁻¹), embora UR2 não tenha diferido destas, sendo UR1 o produto de menor EF. Estes resultados deveram-se ao fato que durante o período inicial de desenvolvimento da cultura, a absorção pelas plantas do N-fertilizante tenha sido restrito na menor dose, sendo este fato acentuado em UR1 e UR2, já que a taxa de liberação do nutriente por estas fontes ter sido mais lenta, ao passo que UR3 e UC estão prontamente disponíveis para as transformações e absorção do N pelas plantas, como evidenciado pelos resultados de recuperação aparente na primeira avaliação.

Tabela 12 – Eficiência fisiológica no uso do N-fertilizante (kg kg⁻¹) pela parte aérea do milho, para cada dose empregada, ao final do ciclo da cultura

Fontes [§]	Doses (mg dm ⁻³)			
	50	100	150	200
	----- kg kg ⁻¹ -----			
UR 1	242,3 b	247,6 b	219,8 b	200,8 a
UR 2	272,7 b	235,9 b	262,4 ab	159,4 a
UR 3	326,9 a	280,4 ab	278,9 a	208,9 a
UC	328,6 a	302,9 a	237,5 ab	191,4 a
P <	0,01	0,01	0,05	NS
CV %	8,89	7,8	12,6	12,6

Médias com as mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% ou 1% de probabilidade. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Tabela 13 – Eficiência fisiológica no uso do N-fertilizante (kg kg^{-1}) pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, para cada dose empregada, ao final do ciclo da cultura

Fontes [§]	Doses (mg dm^{-3})			
	50	100	150	200
	----- kg kg^{-1} -----			
UR 1	210,1 b	227,4 b	204,7 b	187,1 a
UR 2	250,9 ab	207,9 b	234,9 ab	157,2 a
UR 3	293,9 a	262,0 a	256,7 a	199,3 a
UC	293,3 a	269,8 a	223,2 ab	187,9 a
P <	0,01	0,05	0,05	NS
CV %	10,5	11,2	10,9	10,9

Médias com as mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% ou 1% de probabilidade. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Embora com menores valores, as EF na dose de 100 mg dm^{-3} , apresentaram o mesmo comportamento observado na menor dose, sendo UR3 e UC superiores aos demais produtos tanto para parte aérea quanto para planta toda. Na dose de 150 mg dm^{-3} UR1 foi o que apresentou menor valor médio de eficiência fisiológica e que diferiu de UR3. Na dose de 200 mg dm^{-3} , não foi verificada diferença entre fontes. Não foram feitas comparações entre doses, já que por se tratar de uma medida de eficiência, esta tende a diminuir com o aumento das doses de N aplicado, devido o ganho em produção vegetal e acúmulo do nutriente ser menor relativamente ao incremento na disponibilidade de N proporcionado pelo aumento de doses (MOLL; KAMPRATH; JACKSON, 1982; RAUN; JOHNSON, 1999; BANDYOPADHYAY; SARKAR, 2005; AYNEBAND; MOEZI; SABET, 2011).

A menor eficiência apresentada pelos produtos de lenta liberação nas menores doses de N contradizem o relatado por Moll, Kamprath e Jackson (1982) que sugerem que em ambientes em que há restrição de N e, portanto, espera-se que haja menor absorção e recuperação do elemento pela cultura, as plantas de milho se apresentem mais eficientes na utilização do nutriente. No entanto, esse resultado neste experimento deveu-se, provavelmente, ao reduzido volume de solo explorado pelo sistema radicular, impossibilitando que as plantas de milho tivessem acesso ao N nativo do solo, como ocorreria se o experimento tivesse sido conduzido em campo. Observa-se que os valores de EF na parte aérea da cultura são maiores que os valores apresentados na planta toda. Esse fato é atribuído a maior diferença observada na parte aérea da cultura entre os tratamentos que receberam adubação nitrogenada e a do controle, sendo que para este compartimento (parte aérea), as

plantas adubadas acumularam em média 12 vezes mais N e massa seca que no controle, enquanto para o sistema radicular esta diferença foi de apenas 7 vezes, resultando em um efeito de diluição para planta toda e, conseqüentemente, menores valores de EF.

O menor acúmulo de massa seca e N no sistema radicular da cultura deveu-se, principalmente, ao volume restrito de solo dos vasos, além de, neste volume haver quantidade de água e nutrientes suficientes ao desenvolvimento das plantas, tornando-se desnecessário o desenvolvimento de um grande volume de raízes. Segundo Mi, Chen e Zhang (2007), sob condições de baixo suprimento de N as plantas de milho respondem com aumento na relação raiz-parte aérea, resultando em maior quantidade de assimilados nas raízes relativamente ao alocado na parte aérea da cultura. Dessa maneira, a EF calculada para experimento em vasos, em casa de vegetação, pode superestimar a real eficiência fisiologia na utilização do fertilizante nitrogenado, já que em campo as raízes das plantas devem explorar um volume maior de solo, resultando na absorção e utilização do N proveniente de outras fontes presentes no solo.

No decorrer do ciclo da cultura, observa-se para todas as doses de N empregadas, acréscimo nos valores de EF (Figura 6), já que este parâmetro é calculado pela relação massa seca / N acumulado, sendo que esse último tende a decrescer após o período de antese das plantas, como já discutido no tópico 4.2, resultando em maior EF ao final do ciclo.

Figura 6 – Eficiência fisiológica (g.g^{-1}) do N-fertilizante pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, para cada dose empregada, durante todo o ciclo da cultura. UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional

4.6.2 Eficiência Agronômica (EA)

Os valores de eficiência agronômica (EA) no uso do N-fertilizante pela parte aérea (Tabela 14), ao final do período experimental (86 DAS), diferiram apenas na dose de 150 mg dm⁻³, na qual UR1 foi inferior aos demais, sugerindo que para este produto, não tenha ocorrido liberação suficiente de N no período em que a cultura foi mais exigente no nutriente. Também é possível que para as menores doses (50 e 100 mg dm⁻³), as diferenças dentre fontes tenham sido minimizadas devido ao elevado coeficiente de variação desses índices quando comparado com o das demais doses. Não foram verificadas diferenças na EA na planta toda (Tabela 15).

Tabela 14 – Eficiência Agronômica no uso do N-fertilizante (kg kg⁻¹) pela parte aérea do milho, para cada dose empregada, ao final do ciclo da cultura (86 DAS)

Fontes [§]	Doses (mg dm ⁻³)			
	50	100	150	200
	----- kg kg ⁻¹ -----			
UR 1	117,0 a	94,9 a	75,9 b	75,9 a
UR 2	122,7 a	98,7 a	100,6 a	71,3 a
UR 3	150,1 a	122,3 a	100,1 a	80,9 a
UC	133,5 a	116,6 a	98,1 a	75,7 a
P <	NS	NS	0,05	NS
CV %	19,4	20,4	9,7	7,5

Médias com as mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% ou 1% de probabilidade. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Tabela 15 – Eficiência Agronômica no uso do N-fertilizante (kg kg^{-1}) pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, para cada dose empregada, ao final do ciclo da cultura (86 DAS)

Fontes [§]	Doses (mg dm^{-3})			
	50	100	150	200
	----- kg kg^{-1} -----			
UR 1	170,1 a	109,7 a	102,1 a	94,5 a
UR 2	155,5 a	121,6 a	123,7 a	91,8 a
UR 3	171,9 a	144,8 a	101,3 a	101,3 a
UC	157,9 a	135,8 a	124,6 a	96,8 a
P <	NS	NS	NS	NS
CV %	24,8	18,7	11,6	8,1

Médias com as mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% ou 1% de probabilidade. §: UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

Ao contrário do comportamento observado para eficiência fisiológica no uso do N-fertilizante, a EA não apresentou declínio dos valores na planta toda em relação à parte aérea. Isso deveu-se a forma pela qual EA é calculada, que não leva em consideração o N acumulado pelos compartimentos da planta, não havendo efeito diluição para planta toda em relação à parte aérea, como ocorrido em EF. Assim como para os demais índices, não foram feitas comparações dentre as doses de N-fertilizante empregadas, já que EA tende a decrescer com incremento destas, em razão de o suprimento de N exceder as necessidades da cultura do milho nas maiores doses (BANDYOPADHYAY; SARKAR, 2005; LADHA, et al., 2005; DOBERMANN, 2007; ROBERTS, 2008).

Assim como observado na recuperação aparente, foi verificado para planta toda, em todas as doses, comportamento quadrático para EA com o decorrer do período experimental (Figura 7), embora esta não tenha apresentado valores decrescentes ao longo do tempo, como foi evidenciado em RA. Assim como discutido anteriormente, este fato deveu-se a forma como EA é calculada, sendo o numerador da equação, a diferença entre a massa seca acumulada pela planta de um tratamento e o controle, ao contrário de RA, que utiliza a diferença no N acumulado entre esses tratamentos, sendo que há a diminuição deste após o período de antese das plantas de milho (tópico 4.2), o que não se verifica para massa seca.

Figura 7 – Eficiência Agrônômica (g.g⁻¹) do N-fertilizante pela planta toda (parte aérea + sistema radicular) da cultura do milho, para cada dose empregada, durante todo o ciclo da cultura. UR1: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 1; UR2: Ureia recoberta com polímero de lenta liberação 2; UR3: Ureia recoberta com polímero hidrossolúvel; UC: Ureia fertilizante convencional.

5 CONCLUSÕES

1. Ao final do ciclo da cultura, o acúmulo de fitomassa na parte aérea e planta toda de milho foram superiores nos tratamentos em que o N se encontrava prontamente disponível (UR3 e UC), em relação ao tratamento com o produto de lenta liberação UR1, que por sua vez não diferiu de UR2. Não houve diferença entre os tratamentos quanto ao acúmulo de fitomassa do sistema radicular.

2. O acúmulo de N pelas plantas de milho (parte aérea, sistema radicular e planta toda) não diferiu entre as fontes testadas. O incremento nas doses de N, para a média das fontes, promoveu efeito positivo no acúmulo deste nutriente pelas plantas de milho.

3. Os teores de N-NO_3^- e N-NH_4^+ no solo nos tratamentos UR1 e UR2 foram comparativamente menores que UR3 e UC na 1ª avaliação, e maiores nas avaliações seguintes. De maneira geral os teores de N-NO_3^- e N-NH_4^+ aumentaram com o incremento das doses de N, sendo o teor de N-NO_3^- sempre inferior ao de N-NH_4^+ em todas as épocas.

4. A recuperação do N da ureia das diferentes fontes pela técnica isotópica não possibilitou a estimativa do N na planta proveniente do fertilizante, apresentando grande variação nos valores de recuperação (R%), atribuído ao fracionamento isotópico ocorrido durante as reações de transformações do N no solo e na planta.

5. A recuperação aparente (RA%) do N-Ureia na parte aérea e planta toda de milho foi maior para os tratamentos UR3 e UC nas 1ª e 2ª avaliações, não diferindo ao final do ciclo da cultura, dos produtos recobertos com polímeros para lenta liberação (UR1 e UR2).

6. A eficiência fisiológica (EF) no uso do N-Ureia, para parte aérea da cultura, diferiu nas doses de 50 e 100 mg dm^{-3} de N, em que UR3 foi igual a UC, que por sua vez foi superior aos produtos de lenta liberação (UR1 e UR2). Para planta toda as maiores diferenças foram observadas na dose de 100 mg dm^{-3} de N, em que UR3 e UC diferiram de UR1 e UR2.

7. Não foram verificadas para parte aérea e planta toda de milho diferenças entre os tratamentos quanto a eficiência agrônômica (EA) no uso do N-Ureia.

REFERÊNCIAS

- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendações de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 241-248, 2002.
- ANDREUCCI, M.A. **Perdas nitrogenadas e recuperação aparente de nitrogênio em fontes de adubação do capim elefante**. 2007. 102p. Dissertação de (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- ANGHINONI, I. Adubação nitrogenada nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: SANTANA, M.B.M. **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus : CEPLAC/SBCS, 1986. cap.1 p.1-18.
- ANTI, A.B.; MORTATTI, J.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Radicular uptake kinetics of $^{15}\text{NO}_3^-$, $\text{CO}(^{15}\text{NH}_2)_2$ and $^{15}\text{NH}_4^+$ in whole rice plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n.11, p.1695-1710, 2001.
- ARAÚJO, L.A.N.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 771-777, 2004.
- AYNEHBAND, A.; MOEZI, A.A.; SABET, M. The comparison of nitrogen use efficiencies in old and modern wheat cultivars: agroecological results. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, Punjab, v. 10, n. 4, p. 574-586, 2011.
- BAHR, A.A.; ZEIDAN, M.S.; HOZAYN, M. Yeld and Quality of Maize (*Zea mays L.*) As Affected by Slow-Release Nitrogen in Newly Reclaimed Sandy Soil. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science**, Punjab, v. 1, n. 3, p. 239-242, 2006.
- BANDYOPADHYAY, K.K.; SAKAR, M.C. Nitrogen use efficiency, ^{15}N balance, and nitrogen losses in flooded Rice in an Inceptisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, n. 11/12, p. 1661–1679, 2005.
- BARABASZ, W.; ALBINSKA, D.; JASKOWSKA, M.; LIPIEC, J. Biological effects on mineral nitrogen fertilization on soil microorganisms. **Polish journal of Environmental Studies**, Poland, v. 11, n. 3, p. 193-198, 2002.
- BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. (Ed.). **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-46.
- BLOOM, A.J.; JACKSON, L.E.; SMART, D.R. Root growth as a function of ammonium and nitrate in the root zone. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 16, n.2, p. 199-206, 2003.
- BOCKMAN, O.C.; OLFS, H.W. Fertilizers, agronomy and N_2O . **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 52, n. 2/3, p. 165–170, 1998.
- BONO, J.A.M.; RODRIGUES, A.P.D’A.C; MAUAD, M.; ALUQUERQUE, J.C. de; YAMAMOTO, C.R.; CHERMOUTH, K.S.; FREITAS, M.E. de. Modo de aplicação de fertilizantes nitrogenados na qualidade fisiológica de sementes de milho. **Agrarian**, Dourados, v.1, n.2, p.91-102, 2008.

BOUWMAN, A.F. Analysis of global nitrous oxide emissions from terrestrial natural and agro-ecosystems. 14th Congress Soil Science v. 2, p. 261-266, 1990.

BRONSON, K.F.; MOSIER, A.R. Nitrous oxide emissions and methane consumption in wheat and corn-cropped systems in northeastern Colorado. In: HARPER, L.A.; MOSIER, A.R.; DUXBURY, J.M.; ROLSTON D.E. (Ed.). **Agricultural ecosystems effects on trace gases and global climate change**. ASA Madison, WI, 1993. p. 133 –144. (ASA Especial Pub., 55).

BULL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: **Cultura do milho, fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. 301p.

BURESH, R.J.; AUSTIN, E.R.; CRASWELL, E.T. Analytical methods in N research. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 3, p. 37-62, 1982.

BURGER, M.; JACKSON, L.E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v.35, n. 1, p. 29–36, 2003.

BURTON, S.A.Q.; PROSSER, J.I. Autotrophic ammonia oxidation at low pH through urea hydrolysis. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 67, n. 7, p. 2952-2957, 2001.

CAHILL, S.; OSMOND, D.; CROZIER, C.; ISRAEL, D.; WEISZ, R. Winter Wheat and Maize Response to Urea Ammonium Nitrate and a New Urea Formaldehyde Polymer Fertilizer. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, p. 1645-1653, 2007.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A.P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: GALVÃO, J.C.C. ; MIRANDA, G.V.(Ed.). **Tecnologia de produção de milho**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2004. p.139-182.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Uso de inibidor de uréase para aumentar a eficiência da ureia. In: SIMPÓSIO SOBRE INOVAÇÕES RECENTES PARA OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA, 1., 2007, Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: IPNI, 2007. 1 CD ROM.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H.(Ed.). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.148-196.

CANTARELLA, H. Perdas de nitrogênio por volatilização podem comprometer a adubação. **Petrofértil Rural**, v.13, 1992.

CECCARELLI, S. Adaptation to low/high input cultivation. **Euphytica**, Wageningen, v. 92, n. 1/2, p. 203-214, 1996.

CHEN, R.; HU, J.; DITTERT, K.; WANG, J.; ZHANG, J.; LIN, X. Soil total nitrogen and ¹⁵Nitrogen in response to long-term fertilizer management of maize-wheat cropping system in northern China. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 42, n. 3, p.322-331, 2011.

CHENG, W.; NAKAGIMA, Y.; SUDO, S.; AKIYAMA, H.; TSURUTA, H. N₂O and NO emissions from a field of Chinese cabbage as influenced by band application of urea or

controlled-release urea fertilizers. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, n. 2, p. 231–238, 2002.

CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 102, p. 267 – 322, 2009.

CHIKOWO, R.; MAPFUMO, P.; NYAMUGAFATA, P.; GILLER, K.E. Mineral N dynamics, leaching and nitrous oxide losses under maize following two-year improved fallows on a sandy loam soil in Zimbabwe. **Plant and Soil**, The Hague, v. 259, n. 1/2, p. 315–330, 2004.

CHITOLINA, J.C. **Fertilizantes de lenta liberação de N: conceitos**. Ureia coberta com enxofre. Piracicaba: ESALQ/USP, 1994. 16p.

CHOI, W.J.; LEE, S.M.; RO, H.M.; KIM, K.C.; YOO, S.H. Natural ^{15}N abundances of maize and soil amended with urea and composted pig manure. **Plant and Soil**, The Hague, v. 245, n. 2, p. 223-232, 2002.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Balanço de nitrogênio (^{15}N) em um Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas v. 15, n. 2, p.187-193, 1991.

COELHO, A.M. **Balanço de nitrogênio (^{15}N) na cultura do milho (*Zea mays* L.) em um Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado**. 2007. 142p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Lavras, Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1987.

COMISSÃO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. **Deliberação normativa COPAM n.10**, de 16 de novembro de 1986.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>, acesso em:09 mar. 2011.

COOPER, J.R.; RENEAU, R.B. Jr.; KROONTJE, W.; JONES, G.D. Distribution of nitrogenous compounds in a Rhodic Paleudult following heavy manure application. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 13, n. 2, p. 189-193, Apr./June 1984.

COQUE, M.; BERTIN, P.; HIREL, B.; GALLAIS, A. Genetic variations and QLTs for ^{15}N natural abundance in a set of maize recombinant inbred lines. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 97, p. 310-321, 2006.

COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH_3 de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 631-637, 2003.

DALAL, R.C.; WANG, W.; ROBERTSON, G.P.; PARTON, W.J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.41, n. 2, p.165-195, 2003.

DELWICHE, C.C.; STEYN, P.L. Nitrogen isotope fractionation in soils and microbial

reactions. **Environmental Science and Technology**, Washington, v. 4, n. 11, p. 929-935, 1970.

DENMEAD, O.T.; MACDONALD, B.C.T.; BRYANT, G.; NAYLAOR, T.; WILSON, S.; GRIFFITH, D.W.T.; WANG, W.J.; SALTER, B.; WHITE, I.; MOODY, P.W. Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, p. 748-756, 2010.

DOBBIE, K. E.; McTAGGART, I. P.; SMITH, K. A. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. **Journal of Geophysical Research Atmosphere**, Washington, v. 104, n. D21, p. 26891-26899, 1999.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency – measurement and management In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON FERTILIZER BEST MANAGEMENT PRACTICES, 2007. Brussels. **Proceedings**, Brussels. Belgium, 2007, 97p.

DUETE, R.R.C.; MURAOKA, T.; SILVA, E.C.; AMBROSANO, E.J.; TRIVELIN, P.C.O. Acumulo de nitrogênio (^{15}N) pelos grãos de milho em função da fonte nitrogenada em Latossolo vermelho. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p. 463-472, 2009.

DUETE, R.R.C. **Estudo de doses, parcelamento e formas de nitrogênio na adubação de milho usando ^{15}N** . 2000, 152p. Tese (Doutorado em Ciências) Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

EDWARDS, J.H.; BARBER, S.A. Nitrogen uptake characteristics of corn roots at low N concentration as influenced by plant age. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-19, 1976.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; RIZZARDI, M.A.; ARGENTA, G. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em duas épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 71-77, 1997.

EXNER, M.E.; BURBACH, M.E.; WATTS, D.G.; SHEARMAN, R.C.; SPALDING, R.F. Deep nitrate movement in the unsaturated zone of simulated urban lawn. **Journal of Environmental Quality**, Madison, n. 20, p. 658-662, 1991.

FAN, X.; LI, F.; LIU, F.; KUMAR, D. Evaluation for nitrogen efficiency and yield in winter wheat. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, n. 5, p. 853-865, 2004.

FIRESTONE, M.K. Biological denitrification. In: STEVENSON, F.J.; BREMNER, J.M.; HAUCK, R.D.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: American Society of Agronomy, 1982. v. 22, p. 289-326.

FERNANDES, L.A.; VASCONCELLOS, C.A.; FURTINI NETO, A.E.; ROSCOE, R.; GUEDES, G.A.A. Preparo do solo e adubação nitrogenada na produção de grãos e matéria seca e acúmulo de nutrientes pelo milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1691-1698, 1999.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS – FAO.

Disponível em: < <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/en/>>, acesso em: 22 set. 2011.

FRANCIS, D.D.; SCHEPERS, J.S.; VIGIL, M.F. Post-anthesis nitrogen loss from corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 3, p. 659–663, 1993.

FREIRE, F.M.; VASCONCELLOS, C.A.; FRANÇA, G.E. Manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 49-62, 2001.

FRENEY, J.R.; DENMEAD, O.T.; WOOD, A.W.; SAFFIGNA, P.G.; CHAPMAN, L.S.; HAM, G.J.; HURNEY, A.P.; STEWART, R.L. Factors Controlling ammonia loss from trash covered sugar cane fields fertilized with urea. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 31, p. 341-349, 1992.

FRENEY, J.R.; SIMPSON, J.R.; DENMEAD, O.T. Volatilization of ammonia. In: FRENEY, J.R.; SIMPSON, J.R. (Ed.). **Gaseous loss of nitrogen from plant-soil systems**. The Hague: Martinus Nijhoff; Dr. W. Junk, 1983. p. 1-32.

FURLANI, A.M.C.; BATAGLIA, O.C.; LIMA, M. Diferenças entre linhagens de milho cultivadas em solução nutritiva quanto a absorção e utilização do nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v. 44, n. 2, p. 599-618, 1985.

GALLOWAY, J.N.; DENTENER, F.J.; CAPONE, D.G.; BOYER, E.W.; HOWARTH, R.W.; SEITZINGER, S.P.; ASNER, G.P.; CLEVELAND, C.C.; GREEN, P.A.; HOLLAND, E.A.; KARL, D.M.; MICHAELS, A.F.; PORTER, J.H.; TOWNSEND, A.R.; VOROSMARTY, C.J. Nitrogen cycles: past, present, and future. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 70, n. 2, p. 153-226, 2004.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; HEINRICHS, R.; SILVA, M.A. Balanço do nitrogênio da ureia (^{15}N) no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta na cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 3, p. 477-486, 2006.

GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an Ultisol in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 10, p. 1443–1448, 2009.

GINÉ, M.F.; BERGAMIN FILHO, H.; ZAGATTO, E.A.G.; REIS, B.F. Simultaneous determination of nitrate and nitrite by flows injection analysis. **Analytica Chimica Acta**, New York, v. 114, p. 191-197, 1980.

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

GOMES, R.F.; SILVA, A.G. da; ASSIS, R.L. de; PIRES, F.R. Efeito de doses e da época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agrônômicos da cultura do milho sobre plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 931-938, 2007.

GOLDEN, B.R.; NORMAN, R.J.; WILSON, Jr. C.E.; DELONG, R.E. Evaluation of Polymer-Coated Urea for Direct-seeded, Delayed-Rice Production. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 73, n. 2, p. 375-383, 2009.

GOOSSENS A.; De VISSCHER A.; BOECKX P.; CLEEMPUT, O.V. Two-year field study on the emission of N₂O from coarse and middle-textured Belgian soils with different land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 60, n. 1, p. 23-34, 2001.

GRIGGS, B.R.; R.J. NORMAN, C.E.; WILSON, Jr.; N.A. SLATON. Ammonia volatilization and nitrogen uptake for conventional and conservation tilled dry-seeded, delayed-flood rice. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 71, n. 3, p. 745–751, 2007.

GROVE, L.T.; RITCHEY, K.D.; NADERMAN JR, G.C. Nitrogen fertilization of maize on an oxisol of the Cerrado of Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, n. 2, p. 261-265, 1980.

GUBSCH, M.; ROSCHER, C.; GLEIXNER, G.; HABEKOST, M.; LIPOWSKY, A.; SCHMID, B.; SCHULZE, E.D.; STEINBEISS, S.; BUCHMANN, N. Foliar and soil $\delta^{15}\text{N}$ values reveal increased nitrogen partitioning among species in diverse grassland communities. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 34, p. 895-908, 2011.

HADERLEIN, L.; JENSEN, T.L.; DOWBENKO, R.E.; BLAYLOCK, A.D. Controlled release urea as a nitrogen source for spring wheat in western Canada: Yield, grain N content, and N use efficiency. In: INTERNATIONAL NITROGEN CONFERENCE ON SCIENCE AND POLICY: of the 2nd. The Scientific World 1(S2). A.A. 2001. Exton **Proceedings...** Lisse: Balkema and Publishers and The Scientific World, 2001. p. 114–121.

HARMSSEN, K. A comparison of the isotope-dilution and the difference method for estimating fertilizer nitrogen recovery fractions in crops. **Wageningen Journal of Life Sciences**, Wageningen, v. 51, n. 3, p. 349-381, 2003.

HARPER, J.E. Nitrogen metabolism. In: BOOTE, K.J.; BENNETT, J.M.; SINCLAIR, T.R.; **Physiology and determination of crop yield**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1994. Chapt.11A. p. 285-302.

HARRIS, G.H.; HESTERMAN, O.B.; PAUL, E.A.; PETERS, S.; E.JANKE, R.R. Fate of legume and fertilizer nitrogen- 15 in a long term cropping systems experiment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, n. 5, p. 910-915, 1994.

HATLITLIGIL, M.B.; OLSON, R.A.; COMPTON, W.A. Yield, water use, and nutrient uptake of corn hybrids under varied irrigation and nitrogen regimes. **Fertilizers Research**, The Hague, v. 5, n. 3, p. 321-333, 1984.

HAUCK, R.D. Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes. In 'Terrestrial N Cycle'. CLARK, F.E. ;ROSSWALL, T. (Ed.).**Ecological Bulletin** (Stockholm), v. 33, p. 551-62, 1981.

HAUCK, R.D.; BREMMER, J.M. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 28, p. 219-266, 1976.

HOLTAN-HARTWING, L.; BOCKMAN, O.C. Ammonia exchange between crops and air. **Norwegian Journal of Agricultural Sciences**, Norwegian, sup. v.14, 41p, 1994.

HUETT, D.O.; GOGEL, B.J. Longevities and nitrogen, phosphorus, and potassium release patterns of polymer-coated controlled-release fertilizers at 30°C and 40°C. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, n. 7/8, p. 959-973, 2000.

- JENKINSON, D.S.; FOX, R.H.; RAINER, J.H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - the so-called "priming" effect. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 36, n. 3, p. 425-444, 1985.
- JOKELA, W.E.; RANDALL, G.W. Fate of fertilizer nitrogen as affected by time and rate of application on corn. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, p. 1695-703, 1997.
- KANWAR, R.S.; BAKER, J.L.; BAKER, D.G. Tillage and split N-fertilization effects on subsurface drainage water quality and crop yields. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 2, p. 453-460, 1988.
- KROEZE, C.; MOSIER, A.; BOUWMAN, L. Closing the global N₂O budget: a retrospective analysis 1500-1994. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 13, n. 1, p. 1-8, 1999.
- KUZYAKOV, Y.; FRIEDEL, J.K.; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 11-12, p. 1485-1498, 2000.
- LADHA, J.K.; PATHAK, T.J.; KRUPNIK, J.S.; VAN KESSEL, C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 87, p. 85-156, 2005.
- 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 do milho, no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 739-752, 2007.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; SOUZA, M.A. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta a aplicação de misturas de ureia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2331-2342, 2008.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H.; MOTTA S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 489-496, 1997.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KORNODÔRF, G.H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 363-376, 2000.
- LEMAIRE, G.; GASTAL, F.N. N uptake and distribution in plant canopies. In: LEMAIRES, G. (Ed.). **Diagnosis of the nitrogen status in crops**, Berlin: Springer, 1997. p.3-43.
- LIANG, B.C.; MACKENZIE, A.F. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. **Canadian Journal of Soil Science**, Manitoba, v. 74, n. 2, p. 235-240, 1994.
- LU, C.; MA, G.; CHEN, X.; ZHANG, X.; SHI, Y.; HUANG, B. Effect of nitrogen fertilizer and maize straw incorporation on NH₄-¹⁵N and NO₃-¹⁵N accumulation in black soil of northeast China among three consecutive cropping cycles. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Santiago, v. 10, n. 4, p. 443-453, 2010.
- MACHADO, A.T. **Perspectiva do melhoramento genético em milho (*Zea mays* L.)**

visando eficiência na utilização do nitrogênio. 1997. 219p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

MAIA, C.E.; CANTARUTTI, R.B. Acumulação de nitrogênio e carbono no solo pela adubação orgânica e mineral continua na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 39-44, 2004.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** São Paulo: Livrocere, 2006. 638p.

MALHI, S.S.; OLIVER, E.; MAYERLE, G.; KRUGER, G.; GILL, K. S. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 11, p. 1709–1727, 2003.

MAJEROWICZ, N.; PEREIRA, J.M.S.; MEDICI, L.O.; BISON, O.; PEREIRA, M.B.; JUNIOR, U.M.S. Estudo da eficiência de uso do nitrogênio em variedades locais e melhoradas de milho. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 129-136, jun. 2002.

MARIOTI, A.; MARIOTTI, F.; CHAMPIGNY, M.L.; AMARGER, N.; MOYSE, A. Nitrogen Isotope Fractionation Associated with Nitrate Reductase Activity and Uptake of NO_3^- by Pearl Millet. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 69, p. 880-884, 1981.

MASCARENHAS, H.A.A.; NOGUEIRA, S.S.S.; TANAKA, R.T.; MARTINS, A.L.M.; CARMELLO, Q.A.C. Efeito na produtividade da rotação de culturas de verão e crotalaria no inverno. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 534-537, 1998.

MATTSON, M.; HUSTED, S.; SCHJOERRING, J.K. Influence of nitrogen nutrition and metabolism on ammonia volatilization in plants. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 51, n. 1, p. 35–40, 1998.

MELLO, S.Q.S.; FRANÇA, A.F.S.; LANNA, A.C.; BERGAMASCHINE, A.F.; KLIMANN, H.J.; RIOS, L.C.; SOARES, T.V. Adubação nitrogenada em capim-mombaça: Produção, eficiência de conversão e recuperação aparente do nitrogênio. **Ciência Animal Brasileira**, Goiania, v. 9, n. 4, p. 935-947, 2008.

MENGEL, D.B.; BARBER, S.A. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 399-402, 1974.

MI, G.; CHEN, F.; ZHANG, F. Physiological and genetic mechanisms for nitrogen-use efficiency in maize. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, Seoul v. 10, n. 2, p. 57-63, 2007.

MIKKELSEN, R.L.; WILLIAMS, H.M.; BEHEL, A.D. Jr. Nitrogen leaching and plant uptake from controlled-release fertilizers. **Fertilizer Research**, The Haugue, v. 37, n. 1, p. 43–50, 1994.

MINISTERIO DA AGRICULTURA, PECUARIA E DESENVOLVIMENTO - EMBRAPA. Disponível em:

<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_8_168200511157.html>, acesso em: 09 mar. 2011.

- MOLL, R. H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 562-546, 1982.
- MORGAN, J.A.; PARTON, W.J. Characteristics of ammonia volatilization from spring wheat. **Crop Science**, Madison, v.29, n. 3, p. 726-731, 1989.
- MOSIER, A.;KROESE, C. Potential impact on the global atmospheric N₂ O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands. **Chemosphere-Global Change Science**, Oxford, v. 2, n. 3/4, p. 465-473, 2000.
- NELSON, K.A.; PANIAGUA, S.M.; MOTAVALLI, P.P. Effect of Polymer of coated urea, irrigation, and drainage on nitrogen utilization and yield of corn in a Claypan soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 681-687, 2009.
- OORTS, K.; LAURENT, F.; MARY, B.; THIEBEAU, P.; LABREUCHE, J.; NICOLARDOT, B. Experimental and simulated soil mineral N dynamics for long-term tillage systems in northern France. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 441-456, 2007.
- PEREIRA, H.S.; LEAO, A.F.; VERGINASSI, A.; CARNEIRO, M.A.C. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1685-1694, 2009.
- PIOVESAN, R.P.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; MOTTA, A.C.V.; REISSMANN, C.B. Perdas de nutrientes via subsuperfície em colunas de solo sob fertilização mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 757-766, 2009.
- RAMBO, L.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; BAYER, C. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 4, p. 1279-1287, jul-ago, 2004.
- RAIJ, B.V. Nitrogênio. In: RAIJ, B. van. (Ed.). **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. p.163-179.
- RAIJ, B.V; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RAO, A.C.S.; SMITH, J.L.; PAPENDICK, R.I.; PARR, J.F. Influence of added nitrogen interactions in estimating recovery efficiency of labeled nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 6, p. 1616-1621, 1991.
- RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 3, p. 357-363, may-jun, 1999.
- REDDY, G.B.; REDDY, K.R. Fate of nitrogen-15 enriched ammonium nitrate applied to corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 1, p. 111-115, 1993.
- REIS, B.F.; VIEIRA, J.A.; KRUG, F.J.; GINÉ, M.F. Development of a flow injections system two analytical paths for ammonium determination in soil extracts by conductometry. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 8, p. 523- 528, 1997.

- RENNIE, D.A.; PAUL, E.A.; JOHNS, L.E. Natural nitrogen-15 abundance of soil and plant samples. **Canadian Journal of soil Science**, Manitoba, v. 56, n. 1, p. 43-50, 1976.
- RENNIE, R.J. Comparison of Methods of Enriching a Soil with Nitrogen-15 to Estimate Dinitrogen Fixation by Isotope Dilution. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, p. 115-163, 1986.
- RIEDEL, W.E.; PIKUL, J.L.; JARADAT, A.A.; SCHUMACHER, T. E. Crop rotation and nitrogen input effects on soil fertility, maize mineral nutrition, yield, and seed composition. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 4, p. 870-879, 2009.
- ROBERTS, T.L. Improving nutrient use efficiency. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Tubitak, v. 32, p. 177-182, 2008.
- ROBERTSON, G.P.; GROFFMAN, P. Nitrogen transformations. In: Paul, E.A.. **Soil Microbiology, Biochemistry, and Ecology**. New York: Springer, 2007. p. 341-364.
- ROBERTSON, P.G. Nitrogen use efficiency in row-crop agriculture: crop nitrogen use and soil nitrogen loss. In: JACKSON, L.E. (Ed.) **Ecology in Agriculture**. San Diego: Academic Press, 1997. p. 347 – 365.
- ROBINSON, D.; HANDLEY, L. L.; SCRIMGEOUR, C. M. A theory for $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ fractionation in nitrate-grown vascular plants. **Planta**, Berlin, v. 205, n. 3, p. 397-406, 1998.
- ROBINSON, D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam, v. 16, n. 3, p. 153 - 162, 2001.
- RODRIGUES, M.B.; KIEHL, J.C. Volatilização de amônia após emprego de ureia em diferentes doses e modos de aplicação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 37-43, 1986.
- SANTINI, J.M.K.; GAZZOLA, P.R.; GUARESCHI, R.F.; REIS JR, R.A. Produtividade de milho em função de fontes e doses de nitrogênio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 37, 2009. Fortaleza. **Proceedings...** Fortaleza:SBSCS, 2009. p. 323.
- SANTOS, J.G.P. **Disponibilidade de nitrogênio para o milho em Latossolo Vermelho**. 2008. 70p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E. & TRIVELIN, P.C.O. Transformações do nitrogênio proveniente de mucuna-preta e ureia utilizados como adubo na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 12, p. 1427- 1433, 2003.
- SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. spe, p. 917- 926, 2000.
- SCHREIBER, H.A.; STANBERRY, C.O.; TUCKER, H. Irrigation and nitrogen effects on sweet corn row number at various growth stages. **Science**, New York, v. 135, n. 3509, p. 135-136, 1998.

SENGIK, E.; KIEHL J.C. Controle da volatilização de amônia em terra tratada com ureia e turfa pelo emprego de sais inorgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 455-461, 1995.

SHAVIV, A. Advances in Controlled Release of Fertilizers. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 71, p. 1-49, 2000. Word version, before printing.

SHAVIV, A.; MIKKELSEN, R.L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation – a review. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 35, n. 1/2, p. 1–12, 1993.

SHOJI, S.; DELGADO, J.; MOSIER, A.; MIURA, Y. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to coandwater quality. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 7, p. 1051-1070, 2001.

SILVA, E.C.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G.L.; LAZARINI, E.; SÁ, M.E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 353-362, 2005.

SMITH, K.A. Effect of fertilisers on greenhouse gas fluxes: Mechanisms and Global Trends. (MORTWEDT, J.J. ; SHAVIV, A. In: INTERNATIONAL DAHLIA GREIDINGER SYM. ON FERTILISATION AND THE ENVIRONMENT,3., 1997.Haifa. April 1997Technion, Haifa.

STEEGE, M.W.; STULEN, I.; MARY, B. Nitrogen in the environment. In: GAUDRY-MOROT, J.F.; LEA, P.J. (Ed.). **Plant nitrogen**. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

TRIVELIN, P.C.O. **Enriquecimento isotópico de ^{15}N por cromatografia de troca iônica**. 1976. 102p. Dissertação de (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1976.

TRIVELIN, P.C.O. Isótopos que não emitem radiações: Para que servem?. **Visão da Agroindústria**, Sertãozinho/SP, v. 12, p. 25 - 26, set. 2004.

TRIVELIN, P.C.O.; LARA CABEZAS, W.A.R.; BOARETO, A.E. Dinâmica do nitrogênio de fertilizantes fluidos no sistema solo-planta. In: VITTI, G.C.; BOARETO, A.E. (Ed.) **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba: POTAFOS, 1994. p. 253-268.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.C.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas de nitrogênio da ureia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de- açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

ULLOA, A.M.C.; LIBARDI, L.P.; REICHARDT, K. **Utilização do nitrogênio por dois híbridos de milho**. Campinas: Fundação Cargill, 1982. 66p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. Disponível em: <<http://www.nass.usda.gov/Charts and Maps/Field Crops/cornlyd.asp>>, acesso em: 01 mai. 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. (1985) Nitrate/Nitrite Health Advisory (draft). Washington, D.C.: USEPA, Office of Drinking Water.

VAIO, NICOLAS, CABRERA, MIGUEL L., KISSEL, D.E., REMA, JOHN A., NEWSOME, J. FRANK, CALVERT, VAUGHN H., II. Ammonia Volatilization from Urea-Based Fertilizers Applied to Tall Fescue Pastures in Georgia, USA. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 72, n. 6, p. 1665-1671, 2008.

VILLAS BOAS, R.L.; BOARETTO, A.E.; GODOY, L.J.G.; FERNANDES, D.M. Recuperação do nitrogênio da mistura de ureia e sulfato de amônio por plantas de milho. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 2, p. 263-272, 2005.

VILLAS BOAS, R.L.; BOARETTO, A.E.; BULL, L.T.; GUERRINI, I.A. Parcelamento e largura da faixa de aplicação da ureia na recuperação do nitrogênio pela planta de milho. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1177-1184, out./dez. 1999. Suplemento.

VILLAS BOAS, R.L. **Recuperação do nitrogênio da ureia pelo milho**: efetivo da mistura com sulfato de amônio, da dose e do modo de aplicação. 1995. 128p. Tese (Doutorado em Ciências). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P.; OLIVEIRA, M.W. Volatilização de amônia da adubação nitrogenada aplicada sobre solo coberto com palhada de cana-de-açúcar: efeito na produtividade da cana-soca. In: CONGRESSO NACIONAL DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002, Recife. **Anais ...** Recife: STAB, 2002. p. 239-244.

VOLK, G.M. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 51, p. 746-749, 1959.

WANG, F.L.; ALVA, A.K. Leaching of nitrogen from slow-release urea sources in sandy soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 60, n. 5, p. 1454-1458, 1996.

WARNCKE, D.D.; BARBER, S.A. Ammonium and nitrate uptake by corn (*Zea mays* L.) as influenced by nitrogen concentration and $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$ ratio. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 950-953, 1973.

WILSON, M.L.; ROSEN, C.J.; MONCRIEF, J.F. Potato Response to a Polymer-Coated Urea on an Irrigated, Coarse-Textured Soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 4, p. 897-905, 2009.

WUERST, S.B.; CASSMAN, W.G. Fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated wheat. II. Partitioning efficiency of preplant versus late-season application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 4, p. 689-694, 1992.

YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. **Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 2000. 5 p. (Informações Agrônomicas, 91).

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

YONEYAMA, T. Characterization of natural ^{15}N abundance of soils. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S.I. **Mass spectrometry of soils**. New York, 1996. p. 205-223.

YONEYAMA, T.; KANEKO, A. Variations in the natural abundance of ^{15}N in nitrogenous fractions of komatsuna plants supplied with nitrate. **Plant Cell Physiology**, Kyoto, v. 30, n.7, p. 957-962, 1989.

YONEYAMA, T.; OMATA, T.; NAKATA, S.; YAZAKI, J. Fractionation of nitrogen isotopes during the uptake and assimilation of ammonia by plants, **Plant Cell Physiology**, Kyoto, v. 32, n. 8, p. 1211-1217, 1991.

ZHANG, M.; NYBORG, M.; MALHI, S.S.; SOLBERG, E.D. Localized root growth in soil induced by controlled-release urea granule and barley nitrogen uptake', **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 23, n. 3, p. 413-422, 2000.