



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

**DESEMPENHO AGRONÔMICO E VOLATILIZAÇÃO DA
AMÔNIA DE FERTILIZANTES PASTILHADOS E
CONVENCIONAIS NA CULTURA DE MILHO**

WADSON DE MENEZES SANTOS

2017



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

WADSON DE MENEZES SANTOS

**DESEMPENHO AGRONÔMICO E VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA DE
FERTILIZANTES PASTILHADOS E CONVENCIONAIS NA CULTURA DE MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

Orientador
Prof. Dr. Marcelo Ferreira Fernandes

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2017

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S237d Santos, Wadson de Menezes
Desempenho agrônomo e volatilização da amônia de fertilizantes pastilhados e convencionais na cultura de milho / Wadson de Menezes Santos; orientador Marcelo Ferreira Fernandes. – São Cristóvão, 2017.
69 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Agricultura e Biodiversidade) – Universidade Federal de Sergipe, 2017.

1. Milho - Fertilizantes. 2. Nitrogênio. 3. Enxofre. 4. Agronomia. I. Fernandes, Marcelo Ferreira, orient. II. Título.

CDU: 633.15

WADSON DE MENEZES SANTOS

**DESEMPENHO AGRONÔMICO E VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA DE
FERTILIZANTES PASTILHADOS E CONVENCIONAIS NA CULTURA DE MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

APROVADA em 23 de fevereiro de 2017.

Dr. Inácio de Barros
EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS

Dr. André Júlio do Amaral
EMBRAPA SOLOS

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Fernandes
EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS/PPGAGRI-UFS
(Orientador)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

*Aos meus pais José Cláudio dos Santos e
Josefa Auxiliadora de Menezes Santos, e
irmãos Rainara de Menezes Santos e Murillo
de Menezes Santos.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus por iluminar sempre o meu caminho e por me dar forças durante todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais José Cláudio e Josefa Auxiliadora, pelo amor incondicional e incentivo a seguir no caminho dos estudos, e aos meus irmãos Rainara e Murillo, e a minha namorada Laísa Gois pelo amor, carinho e paciência.

Ao Dr. Carlos Martins que foi o responsável pela minha contratação junto ao projeto Petrobras. Ao Dr. Edson Patto, que concedeu seus experimentos para que eu pudesse desenvolver a pesquisa, pelos valorosos ensinamentos e pela companhia nas belas viagens de campo.

Ao Dr. Inácio de Barros pela paciência, confiança, atenção, e imenso apoio nas questões acadêmicas. Ao Dr. Sérgio Procópio pelo apoio.

Agradeço ao Dr. Marcelo Fernandes pela orientação, incentivo, ensinamentos, atenção e confiança depositada em mim.

A Dra. Claudia Jantalia, junto com o Eduardo Bender e o Josimar Batista pelo grande apoio nos experimentos de gases, e pela troca de experiências.

Ao Dr. Heraldo Namorato pelo apoio e dedicação junto ao projeto.

Ao Robson Dantas pelo auxílio nas análises de laboratório.

Aos estagiários do projeto, Erick Dantas, Juliana Moura e Maria Iderlane pelo apoio nas análises de laboratório e coletas de campo.

Aos funcionários do campo experimental de Nossa Senhora das Dores, Thiago Leite e Heribaldo pelo grande apoio, trabalho, dedicação e momentos de descontração. Aos funcionários do campo experimental de Umbáuba, Tiago Muniz, Adailton, Sr. Lima e demais envolvidos que ajudaram a zelar dos experimentos. Enfim, a todos os funcionários da Embrapa Tabuleiros Costeiros que apoiaram na execução deste trabalho.

Aos professores do PPGAGRI pelo conhecimento proporcionado, em especial ao prof. Dr. Sandro Holanda com o qual realizei o estágio de docência.

A Petrobras pelo apoio financeiro ao projeto. A Embrapa Tabuleiros Costeiros e Embrapa Agrobiologia pela estrutura e apoio técnico-científico.

A CAPES pela concessão da bolsa, e ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade da Universidade Federal de Sergipe.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que eu pudesse concluir esta dissertação.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

WADSON DE MENEZES SANTOS, filho de José Cláudio dos Santos e Josefa Auxiliadora de Menezes Santos, nasceu na cidade de Lagarto (SE), em 09 de maio de 1991.

Em abril de 2014, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Sergipe, em São Cristóvão (SE). Durante o período da graduação foi estagiário voluntário, e bolsista de iniciação científica (PIBIC) entre os anos de 2010 e 2014.

Paralelo a graduação em 2012 iniciou o curso técnico em Edificações pelo Instituto Federal de Sergipe, em Aracaju, concluindo o mesmo junto com a graduação em 2014. Em março de 2014, foi contratado como bolsista de desenvolvimento tecnológico e industrial (DTI) pelo Projeto Misturas Homogêneas do Nordeste firmado pela parceria entre a Petrobras e a Embrapa Tabuleiros Costeiros, onde desenvolveu projetos de pesquisa com as culturas do milho e da laranja nos campos experimentais da Embrapa e da empresa Maratá, testando o desempenho agrônômico e ambiental de fontes de nitrogênio com tecnologias agregadas.

Em março de 2015 iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade da Universidade Federal de Sergipe.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO GERAL	7
2. REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1 Caracterização da cultura do milho	9
2.2 Nitrogênio na cultura do milho	9
2.3 Importância do enxofre para o milho	10
2.4 Dinâmica do nitrogênio	11
2.5 Formas de absorção de N pelas plantas	12
2.6 Perdas de nitrogênio	12
2.7 Fertilizantes nitrogenados	13
2.8 Tecnologias dos fertilizantes nitrogenados	13
2.9 Diagnose do estado nutricional das plantas	14
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
4. ARTIGO 1: DESEMPENHO AGRONÔMICO DE COMPOSIÇÕES PASTILHADAS COM UREIA APLICADAS EM COBERTURA NA CULTURA DO MILHO	23
Resumo	23
Abstract	24
4.1. Introdução	24
4.2. Material e Métodos	25
4.2.1. Descrição das áreas experimentais	25
4.2.2. Delineamento experimental e formulações dos produtos	27
4.2.3. Implantação dos experimentos	28
4.2.4. Nitrogênio e enxofre em tecido foliar	28
4.2.5. Produtividade de grãos	28
4.2.6. Dose de máxima eficiência econômica (DMEE)	29
4.2.7. Análise estatística	29
4.3. Resultados e Discussão	29
4.3.1. Teor foliar de N	29
4.3.2. Teor foliar de S	32
4.3.3. Produtividade de grãos	33
4.3.4. Eficiência econômica	36
4.4. Conclusões	39
4.5. Referências Bibliográficas	39
5. ARTIGO 2: EFICIÊNCIA AGRONÔMICA E VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA DE FORMULAÇÕES DE UREIA PASTILHADA E COMPLEXADA COM ENXOFRE E ZINCO NA CULTURA DO MILHO	44
Resumo	44
Abstract	45
5.1. Introdução	45
5.2. Material e Métodos	46
5.2.1. Descrição da área de estudo	46
5.2.2. Delineamento experimental e formulações dos produtos	47
5.2.3. Implantação do experimento	48
5.2.4. Volatilização da amônia (NH ₃)	48

5.2.5. Teor de nitrogênio foliar	49
5.2.6. Produtividade de grãos	49
5.2.7. Análise estatística	49
5.3. Resultados e Discussão	49
5.3.1. Perdas de N por volatilização da amônia	49
5.3.2. Teor de N em tecido foliar	52
5.3.3. Produtividade	53
5.4. Conclusões	55
5.5. Referências Bibliográficas	55
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figura	Página
1 Precipitação mensal durante o ciclo vegetativo nos anos de 2014 e 2015, média de precipitação mensal do período 2001-2015. As datas do florescimento e da colheita são indicadas pelas setas sobre as barras de precipitação. Nos detalhes são apresentadas as precipitações nos primeiros dias após semeadura do milho em 2014 (A) e 2015 (B), e após a cobertura com fertilizantes nitrogenados em 2014 (C) e 2015 (D), no município de Nossa Senhora das Dores (SE)	26
2 Precipitação mensal durante o ciclo vegetativo nos anos de 2014 e 2015, média de precipitação mensal do período 2001-2015. As datas do florescimento e da colheita são indicadas pelas setas sobre as barras de precipitação. Nos detalhes são apresentadas as precipitações nos primeiros dias após semeadura do milho em 2014 e 2015 (A), e após a cobertura com fertilizantes nitrogenados em 2014 (B) e 2015 (C), no município de Umbaúba (SE)	27
3 Respostas dos teores de N foliares às doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, no Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores, SE (A), na safra 2015 e na média das safras 2014-2015, e no Argissolo Acinzentado em Umbaúba, SE, (B) nas safras de 2014, 2015 e na média das safras 2014-2015. * indica que é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão	31
4 Desdobramento da interação doses x fontes de N, para o Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE) na safra de 2014. (A) – ureia pastilhada pura; (B) – ureia pastilhada com S elementar; (C) – ureia pastilhada com sulfato de amônio; (D) – ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar; (E) – ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco; (F) – ureia perolada; (G) sulfato de amônio cristal. * indica que é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão	32
5 Respostas dos teores de S foliares em função das doses de S aplicados em cobertura no milho na média das safras 2014-2015. (A) – no Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE), (B) – no Argissolo Acinzentado em Umbaúba (SE). * indica que é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão	33
6 Produtividade de grãos de milho em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura ajustadas pela equação de Mitscherlich, no (A) Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE), e no (B) Argissolo Acinzentado em Umbaúba (SE), nas safras de 2014, 2015 e na média das safras 2014-2015. * indicam que o ajuste da equação é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão	36
7 Efeitos da (A) ureia perolada e (B) sulfato de amônio cristal no Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores (SE), e (C) ureia perolada e (D) sulfato de amônio cristal no Argissolo Acinzentado, em Umbaúba (SE), na produtividade, acréscimos de renda e dose de máxima eficiência econômica da cultura do milho em resposta a adubação nitrogenada, na média das safras 2014-2015. * indicam que o ajuste da equação é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão	37

ARTIGO 2

Figura		Página
1	Precipitação mensal durante o ciclo vegetativo no ano de 2015, e média de precipitação mensal do período 2001-2015. As datas do florescimento e da colheita são indicadas pelas setas sobre as barras de precipitação. Nos detalhes são apresentadas as precipitações nos primeiros dias após semeadura do milho (A), e após a cobertura com fertilizantes nitrogenados (B), no município de Nossa Senhora das Dores (SE)	47
2	Fluxos diários da volatilização da amônia até o 22º dia após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados em cobertura na dose de 150 kg ha ⁻¹ de N, na cultura do milho em sistema de plantio convencional, no município de Nossa Senhora das Dores (SE) em 2015	50
3	Quantidade acumulada de amônia volatilizada até o 22º dia após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados em cobertura na dose de 150 kg ha ⁻¹ de N, na cultura do milho em sistema de plantio convencional, no município de Nossa Senhora das Dores (SE) em 2015. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = 23,6 %	51
4	Teor de nitrogênio na folha-índice do milho em sistema de plantio convencional, submetido a dose de 150 kg ha ⁻¹ de N em cobertura, em Nossa Senhora das Dores (SE), 2015. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro indicam o desvio padrão. CV = 7,8%	52
5	Correlação entre a volatilização de N-NH ₃ e o teor de N foliar, na cultura do milho submetido a dose de 150 kg ha ⁻¹ de N em cobertura, sob sistema de plantio convencional, no município de Nossa Senhora das Dores (SE) em 2015. NS - não significativo pelo teste t a 5% de probabilidade	53
6	Produtividade de grãos de milho, submetido a dose de 150 kg ha ⁻¹ de N em cobertura, sob sistema de plantio convencional, no município de Nossa Senhora das Dores (SE) em 2015. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro indicam o desvio padrão. CV = 13,1%	54
7	(A) - Correlação entre produtividade de grãos e teor de N foliar; (B) - correlação entre produtividade de grãos e volatilização da amônia. * indica que é significativo pelo teste t a 5% de probabilidade	54

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela	Página
1 Características químicas e físicas do Argissolo Vermelho-Amarelo da área experimental após a calagem, em Nossa Senhora das Dores (SE)	25
2 Características químicas e físicas do Argissolo Acinzentado da área experimental após a calagem, em Umbaúba (SE)	26
3 Descrição dos fertilizantes e teores de nutrientes	27
4 Preços dos produtos praticados no Estado de Sergipe, 2015	29
5 Teor de nitrogênio na folha-índice do milho, na fase de embonecamento e polinização, em função do uso de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura no Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE), e no Argissolo Acinzentado em Umbaúba (SE), nas safras 2014, 2015, e na média dessas safras	30
6 Quantidade de enxofre aplicado em função das doses de nitrogênio testadas..	33
7 Produtividade do milho em função do uso de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura em sistema de plantio convencional, no Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE), e no Argissolo Acinzentado em Umbaúba (SE), nas safras 2014, 2015, e na média das safras 2014-2015	34
8 Dose de máxima eficiência econômica (DMEE), produtividade de grãos e rendas bruta e líquida do milho em função da aplicação de fertilizantes nitrogenados, no Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores (SE), e no Argissolo Acinzentado, em Umbaúba (SE), na média das safras 2014-2015	38

ARTIGO 2

Tabela	Página
1 Características químicas e físicas do Argissolo Vermelho-Amarelo da área experimental após a calagem, em Nossa Senhora das Dores (SE)	45
2 Descrição dos fertilizantes e teores de nutrientes	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

N ₂	Gás nitrogênio
NO	Óxido nítrico
N ₂ O	Óxido nitroso
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺	Amônio
S ⁰	Enxofre elementar
SO ₄ ⁻²	Sulfato
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
CO ₂	Dióxido de carbono
NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
MAP	Fosfato monoamônico
DAP	Fosfato diamônico
MO	Matéria orgânica
H+Al	Acidez potencial
SB	Soma de bases
T	Capacidade de troca catiônica potencial
CTC	Capacidade de troca catiônica
V	Índice de saturação por base
DMEE	Dose de máxima eficiência econômica

RESUMO

SANTOS, Wadson de Menezes. **Desempenho agrônômico e volatilização da amônia de fertilizantes pastilhados e convencionais na cultura de milho.** São Cristóvão: UFS, 2017. 69p. (Dissertação – Mestrado em Agricultura e Biodiversidade).*

O nitrogênio é o elemento mais requerido pela maioria das culturas e o que proporciona os maiores incrementos no rendimento do milho. O pastilhamento da ureia é uma tecnologia que permite a adição de outros elementos, como enxofre e zinco, e visa diminuir as perdas de N, e consequentemente melhorar a eficiência agrônômica dos fertilizantes. No primeiro artigo, o objetivo foi a recomendação de doses de N e avaliação da eficiência agrônômica da ureia pastilhada, e de suas complexações com enxofre e zinco, e fontes convencionais de N aplicados em cobertura na cultura do milho nas condições do Médio Sertão e Sul sergipanos. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com 3 repetições, em esquema de parcelas subdivididas com tratamento adicional. As parcelas foram compostas pelas doses: 75, 150 e 300 kg ha⁻¹ de N, e as subparcelas pelos fertilizantes: ureia pastilhada pura (UP), ureia pastilhada com S elementar (UP+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio (UP+SA), ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar (UP+SA+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco (UP+SA+Zn), ureia perolada (UR), sulfato de amônio cristal (SA), e o tratamento adicional testemunha (TEST). Foram avaliados o teor de N e S foliar, produtividade de grãos, e recomendadas doses de máxima eficiência econômica (DMEE). A adubação nitrogenada proporcionou maiores teores de N foliares, e produtividade de grãos, e estas variáveis aumentaram com o acréscimo das doses de N. Os teores de S foliares aumentaram com o incremento das doses de S. O SA proporcionou maior produtividade que a UR, UP e UP+S na média das safras no Argissolo Acinzentado. As DMEE para a UR foram de 128 kg ha⁻¹ de N no Argissolo Vermelho-Amarelo, e 190 kg ha⁻¹ de N no Argissolo Acinzentado. A dose indicada de SA foi de 119 kg ha⁻¹ de N para ambos os solos, e este tratamento proporcionou as maiores rendas. No segundo artigo, o objetivo foi a avaliação da eficiência agrônômica e as perdas por volatilização da amônia pela aplicação em cobertura no milho de fertilizantes nitrogenados convencionais e pastilhados, e em suas complexações com enxofre e zinco. Foram avaliados a volatilização da amônia, o teor de N foliar, a produtividade de grãos, e a relação entre estas variáveis. Os tratamentos avaliados foram UP; UP+S; UP+SA; UP+SA+S; UP+SA+Zn; UR e SA, todos na dose de 150 kg ha⁻¹ de N, além da testemunha não adubada (TEST), com 3 repetições. Os tratamentos fertilizados apresentaram os maiores teores de N foliares e produtividade de grãos. O SA apresentou produtividade superior ao tratamento UP+SA+S. Do total de N-NH₃ perdido por volatilização, 92,5% ocorreram até o quinto dia após a fertilização. A UP+SA reduziu a volatilização da amônia, não diferindo estatisticamente do SA e TEST. O teor foliar de N correlacionou-se positivamente, enquanto a taxa de volatilização, negativamente, com a produtividade de grãos.

Palavras-chave: Fertilizantes nitrogenados, nitrogênio, sulfato de amônio, perdas de N-NH₃, ureia pastilhada, *Zea mays* L.

* Comitê Orientador: Dr. Marcelo Ferreira Fernandes – Embrapa Tabuleiros Costeiros/PPGAGRI-UFS (Orientador).

ABSTRACT

SANTOS, Wadson de Menezes. **Agronomic performance and ammonia volatilization of pastilled and conventional fertilizers in corn culture.** São Cristóvão: UFS, 2017. 69p. (Thesis - Master of Science in Agriculture and Biodiversity).*

Nitrogen is the most required mineral nutrient for almost all agricultural crops and the one that promotes maize yields mostly. Pastillation is a technology that allows blending urea with other mineral elements like sulfur and zinc homogeneously, aims at subsiding N losses, therefore enhancing the agronomic efficiency of the fertilizers. The aim of the first paper was to establish the recommendation of N rates and to evaluate the agronomic performance of pastille urea and its blend with sulfur and zinc, as well as commercial N sources sidedress applied to maize under the conditions of the Médio Sertão and Southern Sergipe. The experiments were carried out during the 2014 and 2015 seasons in both sites. The experimental design was Complete Blocks with 3 replications in split-plot arrangement with an additional Control treatment (TEST). In the plot 3 rates of N applications were tested: 75, 150 and 300 kg ha⁻¹, while in the subplots the following products were evaluated: Pastille urea (UP), Pastille urea with elemental S (UP+S), Pastille urea with ammonium sulfate (UP+SA), Pastille urea with ammonium sulfate and elemental S (UP+SA+S), Pastille urea with ammonium sulfate and zinc sulfate (UP+SA+Zn), Prilled urea (UR) and Ammonium sulfate (SA). Leaf N and S contents as well as maize yield were evaluated to assess the agronomic performance of the products and to calculate the appropriate N recommendation. Economic assessments of the price for the commercial products and the corn grains allowed estimating the rate of maximum economic efficiency (DMEE). The greater the rate of N applied the higher leaf N content and grain yields of maize. Leaf S contents increased with increasing doses of S applied with the tested fertilizers. Yields with Ammonium sulfate were higher than UR, UP and UP+S in both seasons in Umbaúba (Acrisol) (Southern Sergipe). The DMEE for UR was 128 and 119 kg N ha⁻¹ for Nossa Senhora das Dores (Acrisol) and Umbaúba, respectively. The recommended dose of SA was 119 kg ha⁻¹, since it provided the greater incomes for both sites. In the second paper, the aim was to evaluate the agronomic performance and the losses of N through ammonia volatilization of N fertilizers sidedress applied to maize. Ammonia volatilization, leaf N content and maize yield were evaluated in all products tested in the first paper when applied at a rate of 150 kg ha⁻¹ of N and in the TEST treatment. Three replications were used. All fertilized treatments showed higher leaf N contents and grain yields than TEST. The treatment SA showed yields higher than UP+SA+S. Of all N-NH₃ lost by volatilization, 92.5% took place in the first 5 days after application. The UP+SA treatment reduced ammonia volatilization and did not differ statistically from SA and TEST. Leaf N content correlates positively and N volatilization negatively with grain yield.

Key-words: Nitrogen fertilizers, nitrogen, ammonium sulfate, losses of N-NH₃, pastured urea, *Zea mays* L.

* Supervising Committee: Dr. Marcelo Ferreira Fernandes – Embrapa Tabuleiros Costeiros/PPGAGRI-UFS (Orientador).

1. INTRODUÇÃO GERAL

Nas próximas décadas o setor agrícola passará por um grande desafio que será atender a demanda de alimentos para a população mundial que está em constante crescimento. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e a Alimentação (FAO, 2009) estima-se que, em 2050, a população mundial atinja 9,3 bilhões de habitantes, sendo necessário aumentar entre 50 a 70% a produção de cereais, como milho, arroz e trigo. Para atender a esta demanda crescente em alimentos, existem algumas alternativas como a ampliação das fronteiras agrícolas e o aumento da produtividade das áreas já cultivadas (MARIN, 2012). O Brasil é um dos poucos países com reais possibilidades de contribuir neste processo, por possuir extensas áreas agricultáveis e apresentar grande potencial para aumentos de produtividade por meio da adoção de tecnologias (LOPES; BASTOS, 2007).

O milho é uma das principais culturas brasileiras, se destacando tanto pelo volume da produção quanto pela importância socioeconômica. Na safra 2014/2015 foram cultivados 15,74 milhões de hectares, produzindo 84,73 milhões de toneladas de grãos, um acréscimo de 5,8% em relação à produção da safra precedente (CONAB, 2015). No Nordeste, o estado de Sergipe destaca-se por apresentar a maior produtividade da região, com média de 4.231 kg ha⁻¹ de grãos. Contudo, a sua produção é a quarta maior com 745,9 mil toneladas na safra 2014/2015, ficando atrás respectivamente da Bahia, Maranhão e Piauí (CONAB, 2015).

O Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo, atrás dos EUA e da China (INDEXMundi, 2016a). Apesar desta posição de destaque, o Brasil não figura entre os países com maiores produtividades (FERREIRA, 2008). Na safra 2014/2015 a produtividade média nacional foi de 5.382 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015), próximo à média mundial de 5.640 kg ha⁻¹ (USDA, 2016), em que o Brasil está na 25ª posição entre os países produtores (INDEXMundi, 2016b). Os principais fatores que contribuem para as baixas produtividades são a utilização de variedades ou híbridos não adaptados às condições edafoclimáticas, o nível tecnológico dos produtores, o manejo inadequado do solo, principalmente em relação à adubação nitrogenada (PEDRINHO, 2009).

O Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo (IFA, 2015), fato diretamente ligado à extensa área dedicada à produção agropecuária e à baixa eficiência na utilização de fertilizantes pelas culturas (FRAZÃO et al., 2014). Em 2015, o Brasil consumiu 28,18 milhões de toneladas de fertilizantes, dos quais 19,8 milhões (70%) foram importadas, o que demonstra a grande dependência externa (ANDA, 2015).

A produção nacional de fertilizantes em 2015 foi de 8,36 milhões de toneladas, contra 8,05 milhões toneladas no ano anterior, representando aumento de 4%. Em nutrientes, houve aumento de 16,5% na produção de fertilizantes nitrogenados. Porém, o seu consumo apresentou queda de 11,4%, passando de 3,54 milhões de toneladas em 2014 para 3,14 milhões em 2015 (ANDA, 2015).

O nitrogênio (N) é um macronutriente empregado em grandes quantidades na agricultura moderna, por ser exigido em maior quantidade pelas plantas. Na cultura do milho, atua principalmente no enchimento dos grãos e afeta o teor de proteína (BOARETTO et al., 2007). O fertilizante nitrogenado mais utilizado no Brasil é a ureia, devido a sua elevada concentração em nitrogênio, o que reduz o custo de transporte, além da alta solubilidade e da facilidade de mistura com outras fontes. No entanto, o nitrogênio proveniente da ureia pode ser facilmente perdido por volatilização da amônia, lixiviação do nitrato e desnitrificação (CANTARELLA, 2007a), o que contribui para a baixa eficiência da adubação nitrogenada e, conseqüentemente, na redução da produtividade das culturas. As perdas mais significativas de N em sistemas agrícolas são ocasionadas por volatilização, um processo que é mais intenso em regiões tropicais, como no Brasil, onde há predomínio de altas temperaturas durante a maior parte do ano (FRAZÃO et al., 2014).

Em virtude a baixa eficiência da adubação nitrogenada, tem-se desenvolvido diversos fertilizantes com tecnologias agregadas a base de ureia, como a ureia na forma de pastilhas. Na

fabricação deste produto tem-se a possibilidade de adicionar à ureia outros elementos, como o enxofre, tanto na forma elementar, quanto na forma de sulfato de amônio, bem como fontes de micronutrientes, incorporando assim propriedades suplementares relacionadas à nutrição de enxofre e micronutrientes. A adição de outros elementos a ureia associada ao maior tamanho do grânulo, pode ter efeito na volatilização da amônia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Caracterização da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) pertence à família Poaceae, cujo centro de origem é o México (SILOTO, 2002). Caracteriza-se por ser uma planta de ciclo anual, monocotiledônea, monóica, alógama, de metabolismo fotossintético C4, apresenta grandes folhas alternadas e o seu grão é uma cariopse. Possui uma grande variabilidade genética, principalmente a partir do desenvolvimento de diversas variedades e híbridos (HORN et al., 2006).

O seu ciclo varia em relação a diversos fatores como genótipo, clima e época de semeadura. Mas, em geral, nas cultivares comerciais, o período entre a semeadura e a colheita varia entre 110 a 180 dias (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). De maneira geral o seu desenvolvimento compreende as seguintes fases: germinação e emergência (VE), crescimento vegetativo (V1 até Vn e VT), reprodutiva (R1 a R5) e maturação fisiológica (R6) (CASTRO; KLUGE, 2005).

A melhor época de semeadura do milho compreende o período de maior distribuição das chuvas, para que a fase de floração ocorra no período de dias mais longos, e o enchimento de grãos coincida com o período de temperaturas mais elevadas e alta radiação solar (EMBRAPA, 2006).

Os rendimentos são influenciados por diversos fatores, sendo eles genéticos (variedades e híbridos), de manejo (solo, adubação, controle de ervas daninhas, pragas e doenças) e ambientais (CO₂, luz, temperatura, precipitação) (MAGALHÃES et al., 2002).

O milho é um dos principais cereais cultivados e consumidos no mundo, em virtude de seu alto potencial produtivo, composição química e valor energético. O seu cultivo tem grande importância econômica, uma vez que pode ser utilizado como base na alimentação humana, participando na produção de matéria-prima para cerca de 600 produtos industriais (PEREIRA et al., 2009). E grande parte da produção é destinada à alimentação animal, onde as cadeias produtivas de aves e suínos consomem entre 70 e 80% do milho produzido no Brasil. Na forma de ração, o milho é a principal fonte de carboidratos, além de possuir cerca de 9% de proteína (MIRANDA et al., 2012).

2.2 Nitrogênio na cultura do milho

O aumento da produtividade de qualquer espécie vegetal implica no suprimento adequado de nutrientes, sendo um fator importante, no qual interfere diretamente na produção da cultura do milho, na melhoria da atividade de microrganismos e na qualidade do solo (OKUMURA et al., 2013). Entre os nutrientes, o nitrogênio é requerido em maiores quantidades pelas plantas (GOMES et al., 2007), por desempenhar diversas funções, como componente estrutural da clorofila, faz parte de diversos compostos orgânicos como aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos; e é um dos nutrientes que apresenta os efeitos mais significativos no aumento da produtividade da cultura do milho (CANTARELLA, 2007a). Com isso, o nitrogênio é considerado o nutriente mineral mais importante para praticamente todas as culturas (PAVINATO, 2008).

O N é bastante dinâmico no solo, sofrendo diversas transformações químicas e biológicas. Além disso, apresenta baixo efeito residual, desse modo, a adubação nitrogenada é efetuada em maior quantidade e com maior frequência que os demais nutrientes, já que a maioria dos solos não tem a capacidade de suprir essa demanda (CIVARDI et al., 2011).

Para um manejo eficiente da cultura, é fundamental o conhecimento das diferentes fases do desenvolvimento com suas diferentes demandas, sendo possível adequar o período de adubação com a fase fenológica mais indicada (VIEIRA, 2007).

O milho apresenta três fases de absorção: a primeira no crescimento inicial lento (germinação), a segunda na fase de crescimento rápido, onde cerca de 70 a 80% de toda matéria seca é acumulada, e, na última fase de absorção, o crescimento é novamente lento, acumulando em torno de 10% da massa seca total (CRUZ et al., 2008).

Na cultura do milho, os grãos são considerados o maior dreno, já que sua formação esta diretamente relacionada à translocação de N e açúcares dos órgãos vegetativos para os grãos (SOMAVILLA et al., 2015). Segundo Gava et al. (2006) do total de N acumulado pela cultura, 73% estão presentes nos grãos. Desse modo, os níveis de adubação nitrogenada correlacionam-se diretamente com o rendimento de grãos (GOMES et al., 2007).

As recomendações de adubação nitrogenada evoluíram bastante no Brasil. As principais inovações dizem respeito às recomendações de doses com base na produtividade esperada, levando-se em consideração o tipo de solo e o parcelamento da adubação na época de maior absorção de N (SANTOS et al., 2008).

Para se alcançar altas produtividades de milho, é preciso aperfeiçoar as condições de manejo, de modo que promovam um melhor desenvolvimento da cultura. Para isso, deve-se levar em consideração o potencial genético, o ambiente, o sistema de cultivo, o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, como também fornecer as quantidades de nutrientes na época de maior demanda pela planta, aumentando assim a eficiência da aplicação (CANTARELLA, 1993).

2.3 Importância do enxofre para o milho

O enxofre é um macronutriente secundário, cuja quantidade absorvida pelas culturas pode ser igual ou mesmo superior ao fósforo (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). O enxofre apresenta significativa importância no desenvolvimento das plantas, por ser constituinte de compostos como Acetil-CoA, glutatona, etc., e, assim como o nitrogênio, é constituinte de proteínas, sendo encontrado nos aminoácidos metionina e cisteína (ALVAREZ, 2007)

Mais de 90% do enxofre presente no solo está na forma orgânica, sendo, portanto, necessária à sua mineralização, resultando na produção do íon SO_4^{2-} , para que o mesmo esteja disponível para as plantas (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Em certas condições, também ocorre o processo de imobilização, onde o SO_4^{2-} é convertido em S orgânico por ação dos microrganismos (CÉSAR, 2012). As principais perdas de enxofre em sistemas agrícolas estão relacionadas às exportações pelas culturas, à lixiviação, a erosão do solo e à emissão de gases sulfurados (STIPP; CASARIN, 2010).

A necessidade de enxofre é geralmente suprida via fertilizantes NPK de baixa concentração, sulfato de amônio (22% de S), superfosfato simples (12% de S) e o gesso agrícola (18% de S) que são as formas mais comuns (STIPP; CASARIN, 2010).

A quantidade de nitrogênio requerida pelas plantas é consideravelmente maior que por enxofre. E, quando se incrementam as doses de nitrogênio na adubação, é necessário aumentarem-se também os níveis de enxofre aplicados, com a finalidade de manter um balanço entre esses nutrientes. Mesmo uma planta bem nutrida em N, se houver carência em enxofre, haverá um desequilíbrio nutricional, prejudicando a síntese proteica (CRAWFORD et al., 2000). A relação N/S deve estar em torno de 12-15. Portanto, o teor de N no tecido da planta é dependente da quantidade de S e o aumento na produtividade do milho está intimamente ligada ao adequado suprimento de N e S para formação de aminoácidos e proteínas essenciais a planta (STIPP; CASARIN, 2010).

A dose de enxofre necessária para a maioria das culturas varia entre 15 e 50 kg ha⁻¹ (VITTI; HEINRICHS, 2007). Na cultura do milho recomenda-se 30 kg ha⁻¹ de S, sendo que o milho absorve entre 13 e 21 kg ha⁻¹ a depender da produtividade e, deste total, 60% encontra-se nos grãos (FANCELLI; DOURADO NETO, 2004). Quanto a concentração de S no solo, diversos ensaios em quase todas as regiões do Brasil, indicam que solos com teores superiores a 10 mg dm⁻³ de S tem menor probabilidade de responder a adição de adubos contendo este elemento (MALAVOLTA; MORAES, 2007).

Em torno de 70% da produção mundial de enxofre é obtido a partir do S elementar (S⁰) (LOPES et al., 2010), embora não seja essa a principal fonte de S utilizada na agricultura que emprega, principalmente, o superfosfato simples e o sulfato de amônio. O S⁰, para ser absorvido

pelas plantas, precisa ser oxidado a SO_4^{2-} , processo realizado por microrganismos do solo, que podem ser divididos em quimioautotróficos, como por exemplo, as bactérias do gênero *Thiobacillus*; fotoautotróficos e heterotróficos (bactérias e fungos). Essa reação de oxidação gera acidez ao solo, podendo reduzir as perdas por volatilização da NH_3 , quando associados a fertilizantes nitrogenados (HOROWITZ; MEURER, 2006; VITTI et al., 2015).

No processo de adubação convencional das culturas o enxofre entra em segundo plano, sendo que a sua principal entrada na fertilização é através das formulações NPK de baixos teores (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Portanto, a aplicação do enxofre tem sido discriminada devido a tendência de aplicação de fertilizantes NPK de altos teores de nutrientes para redução dos custos. E, o uso de genótipos melhorados, de alto potencial produtivo e com maiores exigências nutricionais, associado à redução da matéria orgânica do solo (reserva de S no solo), tem tornado a deficiência de enxofre um fator cada vez mais limitante à produção agrícola brasileira (PRADO, 2008). Desta forma, a demanda por fertilizantes sulfatados tem aumentado (DEGRYSE et al., 2016).

2.4 Dinâmica do nitrogênio

Aproximadamente 78% da atmosfera é composta por nitrogênio na forma de N_2 . Em contrapartida, existe escassez desse elemento em formas disponíveis no solo para as plantas, o que pode ser explicado pela grande estabilidade da molécula de N_2 (CANTARELLA, 2007a; REIS, 2013).

O nitrogênio atmosférico pode entrar no sistema solo-planta, por diferentes mecanismos: (a) descargas elétricas, quando o N_2 é reduzido a óxidos, contribuindo com cerca de 3 a 4% de todo o N fixado; (b) fixação biológica (FBN), que envolve a redução do N_2 a amônia (NH_3), pela ação de microrganismos de vida livre ou em associações simbióticas com leguminosas, tais como as bactérias do gênero *Rhizobium*. A capacidade desses microrganismos em fixarem o nitrogênio está ligada à presença e à atividade do complexo enzimático conhecido como nitrogenase (DIALLO et al., 2004; RAYMOND et al., 2004) e (c) fixação industrial do N pelo processo de Haber-Bosch onde, através da técnica de síntese da amônia, são produzidos os vários tipos de fertilizantes nitrogenados (CHAGAS, 2007).

No solo a fonte natural de nitrogênio é a matéria orgânica, representando 95% do N total do solo (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010), sendo que, para sua liberação e absorção pelas plantas, é necessário que ocorra a mineralização pela ação dos microrganismos, ou seja, a transformação do N orgânico em formas inorgânicas, como o amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), pelos processos de amonificação e nitrificação, respectivamente (CANTARELLA, 2007a).

O processo oposto a mineralização é a imobilização, nesse fenômeno o N disponível às plantas é utilizado pelos microrganismos para decompor os resíduos orgânicos do solo e formar os constituintes orgânicos de suas células e tecidos (CANTARELLA, 2007a). A ocorrência desse mecanismo é dependente da relação C/N do material orgânico em decomposição no solo. Quando a relação C/N é maior que 30, a imobilização é favorecida, por outro lado, quando esta relação é menor do que 20, predomina a mineralização. Já quando a relação está na faixa de 20 a 30, os dois processos ocorrem simultaneamente (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Dessa forma, quando a imobilização do N é maior que a sua mineralização, as plantas podem apresentar deficiência temporária desse nutriente. À medida que ocorre a morte dos microrganismos, ocorre a sua mineralização pelo restante da biomassa, liberando os nutrientes imobilizados e, quanto maior o conteúdo de N na biomassa microbiana, mais rápida será a sua reciclagem (SILVA, 2013).

A amonificação é a primeira etapa do processo de mineralização. Devido a ação de microrganismos, ocorre a transformação do N orgânico em NH_3 que, por sua vez, reage com os H^+ do solo formando o íon NH_4^+ e, nesse processo, ocorre a elevação do pH pelo consumo de H^+ do solo (CANTARELLA, 2007a).

Dando sequência ao processo de mineralização, ocorre a nitrificação, que consiste na conversão biológica do N reduzido, na forma de NH_4^+ , em oxidado, nas formas de nitrito (NO_2^-

) e NO_3^- , respectivamente. A oxidação do amônio ocorre em duas etapas, sendo a primeira denominada de nitrificação, que é a transformação do NH_4^+ em NO_2^- , mediada por bactérias aeróbicas, como as do gênero *Nitrosomonas*, e a segunda etapa, chamada de nitratação, que consiste na transformação do NO_2^- em NO_3^- , realizada por bactérias do gênero *Nitrobacter* (CANTARELLA, 2007a).

A desnitrificação, por sua vez, é um processo de respiração anaeróbica realizado por diversas bactérias, entre as quais se destacam as do gênero *Pseudomonas*, que oxidam formas orgânicas de carbono disponível no solo a fim de gerar energia e, para isso, utilizam os óxidos de nitrogênio como aceptores finais de elétrons. Assim, o NO_3^- , NO_2^- , óxido nítrico (NO) e óxido nitroso (N_2O) são sucessivamente reduzidos até o gás nitrogênio (N_2), fechando o ciclo (CANTARELLA, 2007a; HAYATSU et al., 2008).

2.5 Formas de absorção de N pelas plantas

As formas do nitrogênio absorvidas pelas plantas são NO_3^- e NH_4^+ . Estes íons são transportados principalmente por fluxo de massa, portanto sua movimentação junto com a solução do solo até a absorção pelas raízes é gerada pelo gradiente potencial hídrico. Outra forma de contato íon/raiz é por interceptação radicular, porém ocorre em pequena proporção (PRADO, 2008).

O NO_3^- é encontrado em maior quantidade que o NH_4^+ nos solos agrícolas, sendo esta a fonte mais absorvida pelas plantas, isso devido à presença de bactérias nitrificantes (*Nitrosomonas* e *Nitrobacter*) que, pelo processo de nitrificação, oxidam rapidamente o NH_4^+ a NO_3^- em condições aeróbicas. Em relação ao tempo, esse processo ocorre entre 15 e 30 dias. Neste sentido, o teor de NO_3^- no solo depende diretamente da quantidade de NH_4^+ (AITA et al., 2007; CANTARELLA, 2007a).

O NO_3^- absorvido pelas plantas, é posteriormente transformado em NH_4^+ , num processo em que estão envolvidas duas enzimas: a redutase do nitrato (ativada pelo molibdênio), responsável pela transformação do NO_3^- em NO_2^- e a redutase do nitrito (ativada pelo enxofre), que converte o NO_2^- em NH_4^+ para posterior assimilação nos aminoácidos. Portanto, a planta gasta mais energia para formar aminoácidos quando utilizam nitrato como fonte de N (ZAVASCHI, 2010).

2.6 Perdas de nitrogênio

As principais formas de perdas de N no sistema solo-planta são: exportação pela cultura, erosão do solo, volatilização da amônia, lixiviação do nitrato, trocas gasosas do N pela parte aérea das culturas, desnitrificação nas formas de NO, N_2O e N_2 , sendo que na nitrificação também podem ocorrer perdas na forma de N_2O . Este que é um dos principais gases do efeito estufa, o que tem gerado preocupações uma vez que a adubação nitrogenada contribui significativamente com as emissões desse gás. Porém, dentre as diversas formas de perdas de N a principal delas é a volatilização da amônia (KOOL et al., 2011).

As perdas por volatilização da amônia são afetadas por diversos fatores, como a umidade do solo no momento da aplicação do fertilizante, textura, CTC, pH do solo, temperatura, fonte de N empregada e a forma de aplicação (MOTA et al., 2015).

A ureia é a fonte mais susceptível a volatilização. Quando aplicada no solo, ela é hidrolisada em 2 ou 3 dias por ação da urease, resultando na formação de carbonato de amônio. A urease é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo. O carbonato de amônio, resultante da hidrólise, não é estável se desdobrando em NH_3 , CO_2 e água. Parte do NH_3 formado reage com os íons H^+ da solução do solo resultando em NH_4^+ (TASCA et al., 2011). Entretanto, a neutralização da acidez potencial determina a elevação do pH, que pode atingir valores acima de 7 na região próxima aos grânulos do fertilizante aplicado. Com a elevação do pH, a conversão da NH_3 a NH_4^+ torna-se dificultada pela falta de íons H^+ , aumentando a concentração de NH_3 próximo do grânulo de ureia e a probabilidade de volatilização. Esse fenômeno pode ser pequeno, totalizando de 1 a 15 % (CANTARELLA et

al., 2008; SANZ-COBENA et al., 2008), ou atingir valores extremamente altos, maiores do que 50 % do N aplicado (SANGOI et al., 2003; ROCHETTE et al., 2009).

Segundo Cantarella, as perdas por volatilização da amônia são da ordem de 20 a 40% do N aplicado em cana-de-açúcar (CANTARELLA et al., 1999), 16 a 44% em citros (CANTARELLA et al., 2003) e 16 a 61% em pastagens (CANTARELLA et al., 2001). E a eficiência no uso do N é menor com o aumento das doses (SILVA et al., 2014). Esse fato resulta em baixo desempenho produtivo e risco de contaminação ambiental. Porém, a incorporação da ureia reduz significativamente as perdas por volatilização (BIESDORF et al., 2016).

2.7 Fertilizantes nitrogenados

Os fertilizantes nitrogenados mais comercializados no Brasil em 2015 foram respectivamente: ureia, sulfato de amônio, nitrato de amônio, fosfato monoamônico (MAP), fosfato diamônico (DAP) (IPNI, 2016). Correspondendo a cerca de 60% dos fertilizantes nitrogenados comercializados no país, e em função do menor custo e facilidade de produção, a ureia é preferencialmente fabricada em relação às demais fontes de N (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

A ureia é um fertilizante nitrogenado que se apresenta na forma de grânulos brancos e possui, em média, 45% de N na forma amídica $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$, sintetizada a partir de NH_3 e CO_2 . É o fertilizante nitrogenado mais utilizado no mundo. Tem como características alta solubilidade (cerca de $119 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$ de água), baixa corrosividade e boa compatibilidade com diversos fertilizantes e defensivos (CANTARELLA, 2007a). Porém, apresenta algumas desvantagens como elevada higroscopicidade, possibilidade de presença de biureto, facilidade de perdas por lixiviação na forma de NO_3^- e, principalmente por volatilização, uma vez que, depois de aplicada ao solo, sofre hidrólise enzimática, ocorrendo à liberação de NH_3 (CANTARELLA, 2007a, 2007b).

O sulfato de amônio – $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ é um fertilizante que se apresenta na forma de grânulos brancos que contém, em média, 20% de N na forma amoniacal e 22% de S na forma de sulfato. É um dos fertilizantes que mais acidificam o solo, por conta da nitrificação (CAMPOS, 2004). As principais vantagens em relação à ureia e às demais fontes de N são a baixa higroscopicidade, baixa tendência a perdas por volatilização, além de ser fonte de enxofre (COLLAMER et al., 2007).

O sulfato de amônio é produzido a partir de subprodutos da indústria (aço, metalúrgica e produção de nylon), sendo a caprolactama (subproduto da indústria de nylon) uma importante fonte para sua produção, pois, a partir de uma tonelada de caprolactama é possível obter quatro toneladas de sulfato de amônio. Também é possível obter o sulfato de amônio a partir da síntese direta ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$) (FRANCISCO, 2008).

2.8 Tecnologias dos fertilizantes nitrogenados

Tendo em vista a elevada demanda de N pela cultura do milho, e as perdas de N às quais a ureia está sujeita, é imprescindível a busca por tecnologias que aumentem a eficiência da adubação nitrogenada, minimizando as perdas e, conseqüentemente, aumentem o aproveitamento de N pela cultura (QUEIROZ et al., 2011). Essa necessidade tem induzido o desenvolvimento de produtos como os fertilizantes que atuam liberando os nutrientes de forma gradual, podendo ser de liberação lenta, controlada ou estabilizados (CANTARELLA, 2007a).

Não existe uma definição oficial para os fertilizantes de liberação lenta e controlada. Entretanto, os fertilizantes de liberação lenta referem-se, comumente, àqueles dependentes da decomposição microbiana, como a ureia-formaldeído. Eles apresentam baixa solubilidade, sendo que a parte solúvel em água se torna rapidamente disponível, enquanto a outra parte é liberada de forma gradual durante um período mais longo. Os fertilizantes de liberação controlada referem-se normalmente os fertilizantes revestidos ou encapsulados (CIVARDI et al., 2011). Já os fertilizantes estabilizados são os que atuam na inibição da urease e da

nitrificação. Segundo Contin (2007) estes inibidores competem pelo mesmo sítio ativo da urease, diminuindo a atividade dessa enzima e conferindo maior estabilidade à ureia.

O emprego destes fertilizantes tem por finalidade disponibilizar os nutrientes para as culturas por um tempo mais longo, otimizando a sua absorção pelas plantas (MORGAN et al., 2009) e reduzindo o risco de contaminação ambiental pela minimização das perdas por lixiviação do NO_3^- , e das emissões atmosféricas de NH_3 , NO e N_2O . Foi demonstrado que o revestimento da ureia e o inibidor da urease reduziram em cerca de 50% as perdas por volatilização em relação à ureia convencional aplicadas em cobertura na cultura do milho, refletindo, também, em maiores produtividades (PEREIRA et al., 2009).

Outra forma que vem sendo testada é ureia em diferentes tamanhos de grânulos os quais propiciam diferentes formas, se destacando a ureia perolada, a granulada e a pastilhada.

O processo de granulação de ureia consiste em aumentar o diâmetro dos grãos através de recobrimentos sucessivos (engorda) do grão de ureia perolada com a própria solução de ureia, tendo o inconveniente de, no processo de produção, haver a formação de biureto, que em altas concentrações, pode ser tóxico às plantas. O diâmetro médio da ureia perolada é de 1,6 mm, enquanto o da ureia granulada e pastilhada é em média de 3 mm. A melhor qualidade das formas granulada e pastilhada consistem na menor taxa de liberação de nitrogênio, no aumento da resistência e uniformidade dos grãos e na menor segregação quando misturada com outros nutrientes (STAFANATO, 2009). Em relação aos aspectos ambientais, o processo de produção requer um menor consumo de energia além de reduzir de forma substancial a emissão de poeira (BROUWER, 2011).

A tecnologia do pastilhamento da ureia é bastante flexível, pois permite a produção da ureia na sua forma pura padrão, quanto a de fertilizantes especiais a base de ureia pela mistura com outros elementos, na forma de sulfato de amônio, cloreto de potássio, óxido de zinco, enxofre e outros (BAEDER, 2010).

Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados de Sergipe (FAFEN-SE), localizada no município de Laranjeiras-SE, iniciou em novembro de 2007 a produção de ureia granulada, utilizando a técnica desenvolvida pela Toyo Engineering Corporation, tornando-se a pioneira na produção desse fertilizante no país, com capacidade instalada para produzir 600 toneladas por dia (SOUZA FILHO, 2010). Recentemente, tem se implantando nessa unidade a produção de ureia na forma pastilhada. Desenvolvida pela empresa alemã SANDVIK GmbH, a técnica de produção desse tipo de ureia dispensa o uso de formaldeído (SOUZA FILHO, 2010).

2.9 Diagnose do estado nutricional das plantas

A análise química é a principal ferramenta para o diagnóstico da fertilidade do solo e estabelecimento das necessidades de correção e adubação das culturas. Porém, somente uma pequena fração dos nutrientes encontrados no solo está em formas prontamente disponíveis às plantas (CAPÓ et al., 2010). Os tecidos das plantas, por sua vez, demonstram o estado nutricional num dado momento, de modo que a análise dos tecidos, aliada à análise do solo, permite um diagnóstico mais eficiente do estado nutricional de uma cultura. A análise de tecidos torna-se mais importante ainda, no caso do N e dos micronutrientes, para os quais a análise do solo ainda não está bem consolidada (MARTINEZ et al., 2003).

Os nutrientes contidos nas folhas devem estar em quantidades adequadas e equilibradas para atender aos requisitos de produtividade e qualidade das culturas (MALAVOLTA et al., 1997). Para isso, os resultados laboratoriais são comparados com padrões descritos na literatura. Contudo, as análises de tecido foliar nem sempre conseguem diagnosticar a tempo de corrigir possíveis deficiências, pois a depender do estágio fenológico, a planta pode não mais conseguir responder a correções (VARGAS et al., 2012).

O nitrogênio um elemento de alta mobilidade na planta, os sintomas de deficiência ocorrem primeiro nas folhas mais velhas, sendo caracterizado por clorose generalizada, enquanto as folhas novas permanecem com cor verde por períodos mais longos, por receberem, via floema, o N solúvel proveniente das folhas mais velhas (TAIZ; ZEIGER, 2013). Persistindo

a carência, a clorose atinge as folhas mais novas podendo alcançar toda a planta em casos extremos. Ocorre também, a redução da área foliar e do crescimento da planta, afetando diretamente a produtividade da cultura (MALAVOLTA, 2006).

A clorofila ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$) principal pigmento captor de fótons para a fotossíntese, apresenta no centro de sua estrutura molecular um átomo de magnésio ligado a quatro átomos de nitrogênio. Assim, apenas folhas bem nutridas em nitrogênio são capazes de assimilar adequadamente o CO_2 e sintetizar carboidratos durante a fotossíntese, resultando em um maior acúmulo de biomassa e rendimento de grãos. No caso do milho, os teores foliares adequados de N situam entre 27 e 35 $g\ kg^{-1}$ (RAIJ; CANTARELLA, 1996).

Por sua vez, o enxofre devido à baixa capacidade de redistribuição desse elemento na planta, os sintomas de deficiência ocorrem primeiro nas folhas mais jovens, apresentando-se na forma de amarelecimento de todo o limbo foliar (MIRANDA et al., 2010). Porém, a ausência de deficiência não significa que o nível de S disponível no solo esteja adequado, podendo ocorrer à chamada “fome oculta”, ou seja, a planta não apresenta sintomas de deficiência, mas pode haver diminuição na produtividade (HOROWITZ; MEURER, 2005). Os limites de suficiência em S situam entre 1,5 e 3 $g\ kg^{-1}$ (RAIJ; CANTARELLA, 1996).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; HÜBNER, A. P. Nitrificação do nitrogênio amoniacal de dejetos líquidos de suínos em solo sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.1, p.95-102, 2007.

ALVAREZ V., V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F. Enxofre. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H.; de BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; ANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.595-644.

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes de 2015**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

BAEDER, A. 2010. **The Urea Rotoformer: Upgrading your urea product**. Process Paper April 2010. UreaKnowHow.com. Disponível em: <http://www.ureaknowhow.com/urea_j/images/stories/doc/2010_04_baeder_sps_ureaknowhow.com_rotoformer_applications.pdf> acessado em 03/02/2016.

BIESDORF, E. M.; BIESDORF, E. M.; TEIXEIRA, M. F. F.; DIETRICH, O. H.; PIMENTEL, L. D.; ARAUJO, C. Métodos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em solo de cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 3, n. 1, p. 44–50, jan./mar. 2016.

BOARETTO, A. E.; MURUOKA, T.; TRIVELIN, P. C. O. Uso eficiente de nitrogênio nos fertilizantes convencionais. **Informações Agronômicas**, IPNI, n.120, p.13-14, 2007.

BROUWER, M. 2011. **A single solution to the four challenges facing your urea prilling plant**. Process Paper July 2011. UreaKnowHow.com. Disponível em: http://www.ureaknowhow.com/urea_j/images/stories/pdf/2011_07_brouwer_ureaknowhow.com_rotoformer_solves_prilling_tower_problems.pdf . Acesso em: 25 de set. 2015.

CAMPOS, A. X. de. **Fertilização com sulfato de amônio em pré-semeadura e cobertura na cultura do milho em um solo do cerrado de Brasília sob pastagem de *Brachiaria***

decumbens. 2004. 119 f. (Tese de doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 2004.

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. 147-185.

CANTARELLA, H.; ROSSETO, R.; BARBOSA, W.; PENNA, M.J.; RESENDE, L.C.L. Perdas de N por volatilização da amônia e resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada em sistema de colheita de cana sem queima prévia. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 7., 1999, Londrina. **Anais...** Londrina: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 1999. p. 82-87.

CANTARELLA, H.; CORRÊA, L. A.; PRIMAVESI, A. C. Perdas diárias de amônia por volatilização, de duas fontes de adubo nitrogenado aplicados na superfície de pastagens de capim Coastercross. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 38. 2001, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2001, p. 330-331.

CANTARELLA, H.; MATTOS JUNIOR, D.; QUAGGIO, J. A.; RIGOLIN, A. T. Fruit yield of valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 67, n. 3, p. 215-223, 2003.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do solo, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007a, p. 375-470.

CANTARELLA, H. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados: Uso eficiente de nitrogênio em novos fertilizantes no Brasil. **Informações Agronômicas IPNI**, n.120, p.12-13, 2007b.

CANTARELLA, H.; TRIVELIM, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**. 65:397-401, 2008.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. v. 2. cap. 1, p. 5-46.

CAPÓ, B. G.; LANDRAU, J. R. P.; ALERS, S. A.; RIERA, A. The method of foliar diagnosis as applied to sugarcane. **Agricultural Experiment Station**, Universidad of Puerto Rico. Rio Piedras, Bull 123, 47 p. 2010.

CASTRO, P. R. C; KLUGE, R. A. (coords.) **Ecofisiologia de cultivos anuais: trigo, milho, soja, arroz e mandioca**. São Paulo: Nobel, 2005, 126 p.

CÉSAR, F. R. C. F. **Efeito do enxofre elementar na eficiência de fosfatos naturais**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 2012.

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

CHAGAS, A. P. A síntese da amônia: alguns aspectos históricos. **Química Nova**, vol.30 n.1, 2007.

COLLAMER, J. D.; GEARHART, M.; MONESMITH, F. L. Sulfato de Amônio. **Informações Agronômicas**. IPNI, n.10, p 7-8, 2007.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 2 - Safra 2014/15, n. 12 – **Décimo segundo levantamento**, Brasília, p. 1-134, set. 2015.

CONTIN, T. L. M. **Ureia tratada com inibidor da urease NBPT na adubação de cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo**. 2007. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas-SP, 2007.

CRAWFORD, N. M.; KAHN, M. L.; LEUSTEK, T.; LONG, S. R. Nitrogen and sulphur. In: BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. chap. 1, p. 789-849.

CRUZ, S. C. S.; PEREIRA, F. R. S.; SANTOS, J. R.; ALBUQUERQUE, A. W.; SILVA, E. T. Parcelamento da adubação nitrogenada na cultura do milho irrigado em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. vol.12, n.4, 2008.

DEGRYSE F.; AJIBOYE, B.; BAIRD, R.; SILVA, R. C.; MCLAUGHLIN, M. J. Oxidation of elemental sulfur in granular fertilizers depends on the soil-exposed surface área. **Soil Science Society of America Journal**. vol. 80, no. 2, p. 294-305, 2016.

DIALLO, M. D.; WILLEMS, A.; VLOEMANS, N.; COUSIN, S.; VANDEKERCKHOVE, T. T.; DE LAJUDIE, P.; NEYRA, M.; VYVERMAN, W.; GILLIS, M.; VAN DER GUCHT, K. Polymerase chain reaction denaturing gradient gel electrophoresis analysis of the N₂-fixing bacterial diversity in soil under *Acacia tortilis* ssp. *Raddiana* and *Balanites aegyptiaca* in the dryland part of Senegal. **Environmental Microbiology**, v. 6, p. 400-415, 2004.

EMBRAPA. Circular Técnica 87: **Manejo da cultura do milho**. Sete Lagoas, dezembro, 2006, ISSN 1679-1150.

FAO. **2050: Increased investment in agricultural research essential**. Roma, 2009. Disponível em: <<http://www.fao.org/news/story/en/item/35686/icode/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de Milho**. 2^a ed. Piracicaba: Livrocere, 2004. 360 p.

FERREIRA, E. A. **Desempenho de híbridos de linhagens parcialmente endogâmicas de milho em top crosses, em três locais do Estado de São Paulo**. 2008. 76f. Dissertação

(Mestrado em Melhoramento Genético Vegetal) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas-SP, 2008.

FRANCISCO, A. D. M. **Eficiência de fontes de nitrogênio e enxofre na composição químico-bromatológica e algumas características agronômicas da cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (USP), Pirassununga-SP, 2008.

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

GAVA, G. J. C. TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; HEINRICH, 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.

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 agronômicos da cultura do milho sobre plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 931-938, 2007.

HAYATSU, M.; TAGO, K.; SAITO, M. Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 54, p. 33-45, 2008.

HORN, D.; ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; CASSOL, P. C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.30, n.1, 2006.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Uso do enxofre elementar como fertilizante. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 112, p. 4-7, dez, 2005.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, v. 36, n. 3, p. 822-828, 2006.

IFA - **International Fertilizer Industry Association**. IFA database. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org/>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

INDEXMundi, 2016a. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=corn>>. Acesso em: 07 jun. 2016.

INDEXMundi, 2016b. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=corn&graph=yield>>. Acesso em 07 jun. 2016.

IPNI – **International Fertilizer Industry Association**. Consumo aparente de fertilizantes e matérias-primas em 2015. Disponível em: <<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

KOOL, D. M.; DOLFING, J.; WRAGE N.; VAN GROENIGEN, J. W. Nitrifier denitrification as a distinct and significant source of nitrous oxide from soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 174-178, 2011.

LOPES, A. S.; BASTOS, A. R. S. Fertilizantes nitrogenados no Brasil: um problema de escassez. **Informações Agronômicas**. INPI 120: 4-5. 2007.

LOPES, A. A.; DAHER, E.; BASTOS, A. R. R.; GUILERME, L. R. G. Suprimento e extensão das reservas de nutrientes no Brasil. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: INPI – Brasil, 2010. v. 2, cap. 5, p. 283-305.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 23 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 22).

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

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Ed.) **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, p. 189-249, 2007.

MARIN, M. A. **Sistema de visão artificial para a diagnose nutricional de ferro, boro, zinco e cobre em plantas de milho**. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (USP), Pirassununga-SP, 2012.

MARTINEZ, H. E. P.; MENEZES, J. F. S.; SOUZA, R. B. de; VENEGAS, V. H. A.; GUIMARÃES, P. T. G. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 6, p. 703-713, jun. 2003.

MIRANDA, R. A.; DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C. **Sistemas de Produção – Cultivo do Milho**. Embrapa Milho e Sorgo, 8ª ed. 2012.

MIRANDA, R. S.; SUDÉRIO, F. B.; SOUSA, A. F.; GOMES FILHO, E. Deficiência nutricional em plântulas de feijão-de-corda decorrente da omissão de macro e micronutrientes. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 3, p. 326-333, jul-set, 2010.

MORGAN, K. T.; CUSHMAN, K. E.; SATO, S. Release mechanisms for slow-and controlled-release fertilizers and strategies for their use in in vegetable production. **Horttechnology**, v. 19, n. 1, p. 10-12, 2009.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. p. 729.

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

- OKUMURA, R. S.; MARIANO, D. C.; ZACCHEO, P. V. C.; ALBUQUERQUE, A.; GIEBELMEIER, C. G.; LOBATO, A. K. S.; FRANCO, A. N. A.; NETO, C. O.; SALDANHA, C. M.; CONCEICÃO, H. E. O.; SILVA, R. T. L. Efficiency of Utilization of Nitrogen Coated with Urease Inhibitor in Maize. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v.16, p. 871-876, 2013.
- PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A.; GIROTTO, E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p.358-364, 2008.
- PEDRINHO, E. A. N. **Isolamento e caracterização de bactérias promotoras de crescimento em milho (*Zea mays* L.)**. 2009. 74f. Tese (Doutorado em Microbiologia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal-SP, 2009.
- PEREIRA, H. S.; LEÃO, A. F.; VERGINASSI, A.; CARNEIRO, M. A. C. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1685-1694, 2009.
- PRADO, R. M. **Manual de Nutrição de Plantas Forrageiras**. Editora Funep, 2008. 412p.
- QUEIROZ, A. M.; SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H.; SILVA, A. A. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 3, p. 257-266, 2011.
- RAIJ, B. Van.; CANTARELLA, H. Cereais. In: RAIJ, B. Van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Eds). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2ª Ed. Ver. Campinas: IAC. 1996. (IAC Boletim Técnico, 100).
- RAYMOND, J.; SIEFERT, J. L.; STAPLES, C. R.; BLANKENSHIP, R. E. The natural history of nitrogen fixation. **Molecular Biology and Evolution**, v. 21, p. 541-554, 2004.
- REIS, V. M. Como fazer uma agricultura verde usando o mais antigo processo de obtenção de nitrogênio em plantas. **Acta scietiae & technicae**. v. 1, n. 1, feb. 2013.
- ROCHETTE, P.; ANGERS, D.; CHANTINI, M.H.; MacDONALD, J. D.; GASSER, M. & BERTRAND, N. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 84:71-80, 2009.
- SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A. & RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, 33:87-692, 2003.
- SANTOS, F. C.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SEDIYAMA, C. S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1661-1674, 2008.
- SANZ-COBENA, A.; MISSELBROOK, T.H.; ARCE, A.; MINGOT, J.I.; DIEZ, J.A. & VALLEJO, A. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 126:243-249, 2008.

- SILOTO, R. C. **Danos e biologia de Spodoptera frugiperda (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) em genótipos de milho**. 2002. 93 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 2002.
- SILVA, T. C. **Carbono orgânico e nitrogênio em solo de bananal irrigado e submetido a práticas conservacionistas**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) 2013 - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013.
- SILVA, A. G.; FRANÇA, A. F. S.; MIYAGI, E. S.; DAMBROS, C. E.; LOPES, F. B. Eficiência da fertilização fosfatada e nitrogenada em cultivares de milho. **Ciência Animal Brasileira**, vol.15 no.2, Goiânia, April/June, 2014.
- SOMAVILLA, L.; BASSO, C. J.; FABBRIS, C.; ROS, C. O.; SILVA, V. R.; PINTO, M. A. B.; BRUN, T.; DEMARI, G. H. Ciclagem do nitrogênio pela parte aérea do milho submetido a doses de dejetos líquidos de suínos. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 2, p. 481-488, Mar./Apr. 2015.
- SOUZA FILHO, L.F. da S. **Volatilização de amônia e recuperação de nitrogênio pelo milho da ureia perolada, granulada e pastilhada**. 2010. 67 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.
- STAFANATO, J.B. **Aplicação de misturas granuladas NK e NS em cultivar de arroz (Oryza sativa)**. 67 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2009.
- STIPP, S. R.; CASARIN, V. **A importância do enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. P. 14-20. (Informações Agronômicas, 129).
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918 p.
- TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CASSOL, P. C. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:493-502, 2011.
- USDA. **World Agricultural Production**. Circular Series, WAP 6-16 June, 2016. Disponível em: <<http://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2016.
- VARGAS, V. P.; SANGOI, L; ERNANI, P. R.; SIEGA, E.; CARNIEL, G.; FERREIRA, M. A. Os atributos nas folhas são mais eficientes que o N mineral no solo para avaliar a disponibilidade desse nutriente para o milho. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p. 245-255, 2012.
- VIEIRA, M. A. **Cultivares e população de plantas na produção de milho-verde**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2007.
- VITTI, G. C.; HEINRICH, R. Formas alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: uma visão holística. In: YAMADA, T; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Ed.) **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, p. 109-160, 2007.
- VITTI, G. D.; OTTO, R.; SAVIETO, J. Manejo do enxofre na agricultura. **Informações Agronômicas**. IPNI, n.152, 14 p., 2015.

ZAVASCHI, E. **Volatilização da amônia e produtividade do milho em função da aplicação de ureia revestida com polímeros**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 2010.

4. ARTIGO 1

DESEMPENHO AGRONÔMICO DE COMPOSIÇÕES PASTILHADAS COM UREIA APLICADAS EM COBERTURA NA CULTURA DO MILHO

Periódico a ser submetido: Revista Brasileira de Ciência do Solo

RESUMO

O pastilhamento da ureia é uma tecnologia que permite a complexação com outros elementos como o enxofre e zinco e, dessa forma, apresenta o potencial de aumentar a eficiência da adubação nitrogenada. Este trabalho teve como objetivo a recomendação de doses de N para as fontes comerciais, e avaliar o desempenho agronômico de fertilizantes nitrogenados, incluindo composições pastilhadas de ureia com diferentes fontes de S e Zn, aplicados em cobertura na cultura do milho, em sistema de plantio convencional. Para isto, dois experimentos idênticos foram estabelecidos e conduzidos nas safras 2014 e 2015, sendo um em Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores, e outro em Argissolo Acinzentado, em Umbaúba, ambos em Sergipe. Estes experimentos foram implantados num delineamento em blocos ao acaso, com 3 repetições, em esquema de parcelas subdivididas, com um tratamento adicional. As parcelas foram compostas pelas doses 75, 150 e 300 kg ha⁻¹ de N, e as subparcelas por sete fertilizantes: ureia pastilhada pura (UP), ureia pastilhada com S elementar (UP+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio (UP+SA), ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar (UP+SA+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco (UP+SA+Zn), ureia perolada (UR), sulfato de amônio cristal (SA), e o tratamento adicional testemunha (TEST). O acréscimo das doses de N incrementou o teor de N foliar e a produtividade de grãos, e o teor de S foliar aumentou com as doses de S. O SA proporcionou maior produtividade que a UR, UP e UP+S, na média das safras no Argissolo Acinzentado. As doses de máxima eficiência econômica para a UR foram de 128 kg ha⁻¹ de N no Argissolo Vermelho-Amarelo e de 190 kg ha⁻¹ de N no Argissolo Acinzentado. A dose indicada de SA foi de 119 kg ha⁻¹ de N para ambos os solos. O SA proporcionou maiores receitas bruta e líquida em relação a UR.

Palavras-chave: adubação, fertilizantes nitrogenados, *Zea mays* L.

ABSTRACT

Agronomic performance of compositions pastilled with urea applied in coverage in corn culture

Urea pastillation is a technology that allows the composite mixture with other elements like sulfur and zinc and, by that, has the potential to increase the efficiency of nitrogen fertilization. The aim of this work were to provide a first approach for recommendations of fertilization for maize of commercial N sources and to assess the agronomic performance of N fertilizers, including pastille urea and its composition with different sources of S and Zn. The fertilizers were sidedress applied to maize cultivated using conventional tillage. Two identical experiments were carried out in 2015 and 2015 seasons. One experiment was set up on and Acrisol in Nossa Senhora das Dores and another on an Acrisol in Umbaúba, both sites in the State of Sergipe. The experimental design was Complete Blocks with 3 replications in split-plot arrangement with an additional Control treatment (TEST). In the plot 3 rates of N applications were tested: 75, 150 and 300 kg ha⁻¹, while in the subplots the following products were evaluated: Pastille urea (UP), Pastille urea with elemental S (UP+S), Pastille urea with ammonium sulfate (UP+SA), Pastille urea with ammonium sulfate and elemental S (UP+SA+S), Pastille urea with ammonium sulfate and zinc sulfate (UP+SA+Zn), Prilled urea (UR) and Ammonium sulfate (SA). The greater the rate of N applied the higher leaf N content and grain yields of maize. Leaf S contents increased with increasing doses of S applied with the tested fertilizers. Yields with Ammonium sulfate were higher than UR, UP and UP+S in both seasons in Umbaúba. The rate that corresponded to the maximum economic efficiency for UR was 128 and 119 kg N ha⁻¹ for Nossa Senhora das Dores and Umbaúba, respectively. The recommended dose of SA was 119 kg ha⁻¹, since it provided the greater incomes for both sites.

Key-words: fertilization, nitrogen fertilizers, *Zea mays* L.

4.1. Introdução

O milho é um dos mais importantes produtos agrícolas brasileiros, sendo produzido em todos os estados da federação que, juntos, somaram uma produção média de 76,1 milhões de toneladas nas últimas cinco safras (2011/2012 a 2015/2016), com uma produtividade média de 4.865 kg ha⁻¹ de grãos (CONAB, 2012; 2013; 2014; 2015; 2016). Historicamente, a produtividade média brasileira de milho está muito abaixo da média norte-americana que, na última safra, foi de 10.324 kg ha⁻¹ de grãos (USDA, 2016). Entre os diversos fatores que contribuem para a baixa produtividade, tem-se destacado o manejo incorreto de fertilizantes, principalmente dos nitrogenados. De acordo com Coelho et al. (2007) a quantidade média de nitrogênio (N) empregada em lavouras comerciais do Brasil é de 60 kg ha⁻¹, sendo muito inferior às da China e dos Estados Unidos, que correspondem a 130 e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

O nitrogênio é um dos nutrientes mais requeridos e de maior custo para a cultura do milho. Várias características que influenciam a produção final do milho são fortemente impactadas pelo estado nutricional da planta em nitrogênio (MORAIS et al., 2015). Esta forte influência está associada ao fato de o N desempenhar importantes funções metabólicas na planta, sendo constituinte de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos, citocromos, clorofila e atuar diretamente na expansão e divisão celulares (HAWKESFORD et al., 2012; MALAVOLTA, 2006).

Dos nutrientes, o N é o de manejo e recomendação mais complexos, em virtude da multiplicidade de reações químicas e biológicas que controlam sua disponibilidade, as quais,

por sua vez, são fortemente influenciadas pelas condições edafoclimáticas (CANTARELLA; DUARTE, 2004).

Geralmente, o aproveitamento do N de fertilizantes minerais pelo milho decresce com o aumento da dose aplicada, já que estes incrementos potencializam as perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação, principalmente quando se utiliza a ureia como fonte (LARA CABEZAS et al., 2000; CANTARELLA; DUARTE, 2004; SILVA et al., 2006). Para minimizar as perdas, o N é aplicado em cobertura no período de maior demanda pela planta. No milho, isso ocorre entre os estádios V4-V6, pois é nesta fase que o potencial produtivo da cultura é determinado (SANGOI et al., 2007). Mesmo assim, estima-se que mais de 50% do total de N aplicado via adubação seja perdido por estes processos (CANTARELLA, 2007a).

A alta demanda de N pelo milho, associada à baixa capacidade dos solos não fertilizados de supri-la, às altas perdas de N no solo e ao alto custo destes fertilizantes, reforçam a importância de um manejo eficiente das adubações nitrogenadas para a obtenção de produtividades competitivas. Assim, visando aumentar a eficiência da adubação nitrogenada, é imprescindível o estudo de novas fontes e de doses de N, que minimizem as perdas ambientais, melhorem o desempenho agrônomo e, ao mesmo tempo, aumentem a receita do produtor.

A ureia pode apresentar diversas formas, como a perolada (1,6 mm), a granulada (3 mm) e a pastilhada (3 mm). Está última permite a produção de fertilizantes mistos, podendo agregar diversos nutrientes numa única pastilha. A adição de outros elementos à ureia e o aumento do tamanho do grânulo podem reduzir a volatilização da amônia, constituindo-se, assim, possíveis estratégias de produção de fertilizantes para o aprimoramento do desempenho agrônomo das culturas.

Este trabalho teve como objetivos (i) avaliar o desempenho agrônomo de fontes de nitrogênio convencionais, e da ureia pastilhada, pura ou complexada com enxofre (enxofre elementar e sulfato de amônio) e zinco, na adubação de cobertura do milho em plantio convencional e (ii) obter a recomendação de doses de máxima eficiência econômica para os fertilizantes comerciais nestas condições.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Descrição das áreas experimentais

Os experimentos foram estabelecidos nos anos de 2014 e 2015, no Campo Experimental Jorge Sobral, em Nossa Senhora das Dores (SE), na região do Médio Sertão sergipano, e no Campo Experimental de Umbaúba (SE), no Sul sergipano, ambas estações pertencentes a Embrapa Tabuleiros Costeiros.

No Campo Experimental Jorge Sobral (10°27'S e 37°11'O, altitude média de 200 m) o solo é um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argilosa e de relevo ondulado (EMBRAPA, 2013), a temperatura média anual é de 26°C e a precipitação média anual é de 1082 mm (Figura 1). As características químicas e físicas do solo da área experimental são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas e físicas do Argissolo Vermelho-Amarelo da área experimental após a calagem, em Nossa Senhora das Dores (SE)

Características químicas												
Profundidade	pH (H ₂ O)	¹ MO - g kg ⁻¹	P - mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Na	² SB	³ T	⁴ V - %
0-20 cm	5,9	16,3	6,2	35,9	24,2	18,8	11,9	0,3	1,3	45,3	57,2	79,2
20-40 cm	5,8	12,9	2,4	16,8	21,9	16,6	12,0	0,2	0,9	39,8	51,8	76,8
Características físicas												
Profundidade	Areia		Silte		Argila		Classe textural					
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹							
0-20 cm	552		183		265		Franco argilo arenosa					
20-40 cm	489		194		317		Franco argilo arenosa					

¹MO: matéria orgânica; ²SB: soma de bases trocáveis; ³T: capacidade de troca catiônica potencial; ⁴V: Saturação

por base. Métodos de análise: pH (H₂O – 1:2,5); MO (colorimetria); P, K e Na (Mehlich 1); Al, Ca e Mg (KCl 1 molar); H+Al (acetato de cálcio); textura (método do densímetro).

Na Figura 1 é apresentada a distribuição mensal das chuvas durante o ciclo vegetativo da cultura do milho, nas safras 2014 e 2015, no C.E. Jorge Sobral em Nossa Senhora das Dores (SE).

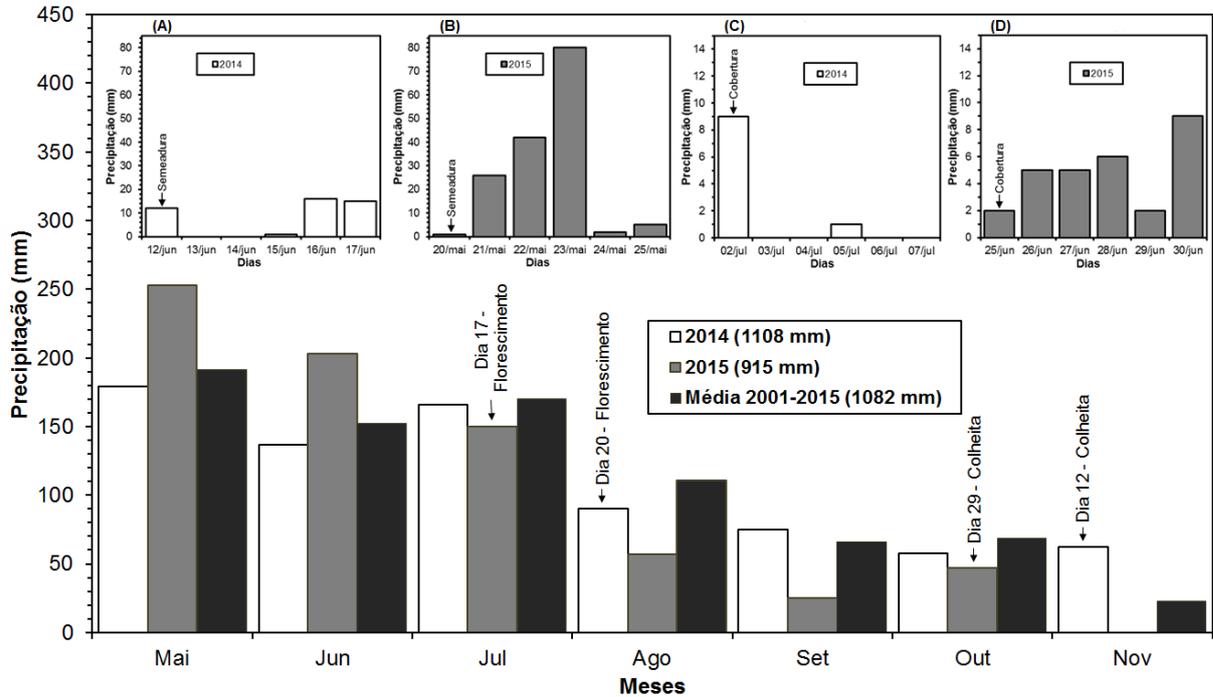


Figura 1. Precipitação mensal durante o ciclo vegetativo nos anos de 2014 e 2015, média de precipitação mensal do período 2001-2015. As datas do florescimento e da colheita são indicadas pelas setas sobre as barras de precipitação. Nos detalhes são apresentadas as precipitações nos primeiros dias após sementeira do milho em 2014 (A) e 2015 (B), e após a cobertura com fertilizantes nitrogenados em 2014 (C) e 2015 (D), no município de Nossa Senhora das Dores (SE).

No Campo Experimental de Umbaúba (11°22'37''S e 37°40'26''O, altitude média de 109 m), o solo é um Argissolo Acinzentado eutrófico de textura média (EMBRAPA, 2013). O tipo climático da região é, segundo a classificação de Köppen, AS - tropical chuvoso com verão seco, e a média anual de precipitação é de 1421 mm (Figura 2). As características químicas e físicas da área experimental são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características químicas e físicas do Argissolo Acinzentado da área experimental após a calagem, em Umbaúba (SE)

		Características químicas										
Profundidade	pH (H ₂ O)	¹ MO - g kg ⁻¹	P - mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Na	² SB	³ T	⁴ V
								mmolc dm ⁻³				%
0-20 cm	5,4	19,9	45,9	103,6	26,9	13,8	19,7	0,8	1,4	44,8	64,5	69,5
20-40 cm	5,1	18,3	12,4	60,2	16,9	9,4	19,5	1,2	0,6	28,5	48,0	59,3
		Características físicas										
Profundidade	Areia		Silte		Argila		Classe textural					
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹							
0-20 cm	659		99		242		Franco argilo arenosa					
20-40 cm	627		110		263		Franco argilo arenosa					

¹MO: matéria orgânica; ²SB: soma de bases trocáveis; ³T: capacidade de troca catiônica potencial; ⁴V: índice de saturação por base. Métodos de análise: pH (H₂O 1:2,5); MO (colorimetria); P, K e Na (Mehlich 1); Al, Ca e Mg (KCl 1 molar); H+Al (acetato de cálcio); textura (método do densímetro).

Na Figura 2 é apresentada a distribuição mensal das chuvas durante o ciclo vegetativo no C.E. de Umbaúba (SE).

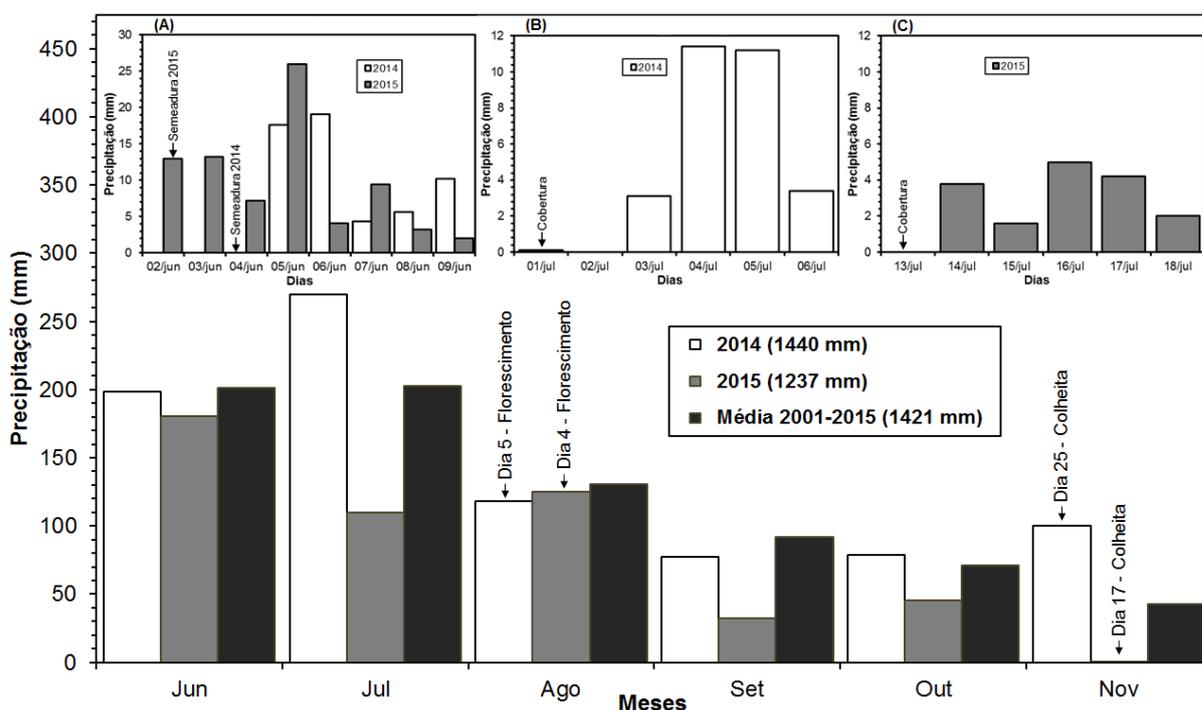


Figura 2. Precipitação mensal durante o ciclo vegetativo nos anos de 2014 e 2015, média de precipitação mensal do período 2001-2015. As datas do florescimento e da colheita são indicadas pelas setas sobre as barras de precipitação. Nos detalhes são apresentadas as precipitações nos primeiros dias após semeadura do milho em 2014 e 2015 (A), e após a cobertura com fertilizantes nitrogenados em 2014 (B) e 2015 (C), no município de Umbaúba (SE).

4.2.2. Delineamento experimental e formulações dos produtos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC), com três repetições, no esquema de parcelas subdivididas com um tratamento adicional. Às parcelas foram atribuídas as doses de N: 75, 150 e 300 kg ha⁻¹ de N, e as subparcelas foram compostas por sete fertilizantes: ureia pastilhada pura (UP), ureia pastilhada com S elementar (UP+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio (UP+SA), ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar (UP+SA+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco (UP+SA+Zn), ureia perolada (UR), sulfato de amônio cristal (SA), e testemunha (TEST - sem aplicação de N – Tratamento adicional) perfazendo-se, portanto, 22 tratamentos, distribuídos em 72 unidades experimentais. Na Tabela 3 é apresentada composição dos fertilizantes.

Tabela 3. Descrição dos fertilizantes e teores de nutrientes

Fertilizantes	Código	N %	S %	Zn %
Ureia pastilhada pura	UP	44,9	-	-
Ureia pastilhada com S elementar	UP+S	44,3	7	-
Ureia pastilhada com sulfato de amônio	UP+SA	37,2	7	-
Ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar	UP+SA+S	40,7	7 (50% SA e 50% S)	-
Ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco	UP+SA+Zn	35	7	1
Ureia perolada	UR	45,9	-	-
Sulfato de amônio cristal	SA	20	22	-

Legenda: S - enxofre elementar; SA - sulfato de amônio

Em 2014, as subparcelas tiveram as dimensões de 2,8 m x 5 m (14 m²). Já no ano

seguinte continham 2 m x 5 m (10 m²). Em ambos os anos as subparcelas foram compostas por quatro linhas de plantio, sendo considerada como área útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,5 m das extremidades de cada linha. As subparcelas foram separadas uma das outras por uma linha de bordadura em 2014, e por duas linhas em 2015.

Como o experimento foi semeado mecanicamente, para garantir que a testemunha não recebesse N, e que a única fonte externa de N fosse a dos produtos a serem testados, não houve aplicação de N na adubação de plantio. Os tratamentos foram aplicados a lanço em cobertura nas quatro linhas centrais de cada subparcela entre os estádios V4-V5, de acordo com manejo descrito por Coelho (2010), exceto em Umbaúba, em 2015, em que a cobertura foi realizada no estádio V6.

4.2.3. Implantação dos experimentos

Foram aplicados em 2014 nas áreas experimentais 1.200 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, sendo incorporado a 20 cm de profundidade, 60 dias antes da semeadura.

O preparo do solo constituiu-se de uma gradagem pesada, e duas passagens com grade niveladora, sendo uma passada no sentido transversal e outra no sentido longitudinal às linhas de plantio.

As semeaduras ocorreram nos dias 12/06/2014 e 20/05/2015 no Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores, e nos dias 04/06/2014 e 02/06/2015 no Argissolo Acinzentado, em Umbaúba, e foram realizadas mecanicamente. Em 2014, foi utilizada uma semeadora-adubadora de duas linhas da marca Fitarelli, acoplada a um micro trator Yanmar Agritech. Foi utilizado o híbrido simples AG 7088 PRO 2[®]. As sementes foram distribuídas em um espaçamento entre linhas de 0,7 m, com densidade de semeadura de 68.000 sementes por hectare. Em 2015, foi utilizada uma semeadora-adubadora pneumática da marca Jumil, modelo 2670 Pop Exacta Air com quatro linhas, tracionadas por um trator New Holland modelo TM 165 - 4x4. Foi utilizado nas semeaduras o híbrido simples AG 7088 VT PRO MAX[®], com densidade de semeadura de 74.000 sementes por hectare distribuídas num espaçamento entre linhas de 0,5 m, utilizando uma velocidade de plantio de 5 km h⁻¹. As sementes foram depositadas a 5 cm de profundidade.

As adubações de plantio constaram da aplicação de 43,64 kg ha⁻¹ de P na forma de superfosfato triplo (244 kg ha⁻¹ do produto), e 66,41 kg ha⁻¹ de K na forma de cloreto de potássio (133 kg ha⁻¹ do produto), sendo o adubo depositado 5 cm abaixo, e 5 cm ao lado da semente. A emergência das plantas ocorreu em média seis dias após a semeadura.

Trinta dias após a semeadura foi aplicado o herbicida Glifosato na dose de 1.440 g do i.a. ha⁻¹ para controle de plantas daninhas. Não foi necessário nenhum controle fitossanitário.

4.2.4. Nitrogênio e enxofre em tecido foliar

Amostras de folhas foram coletadas quando o milho estava no início do estádio R1 (embonecamento e polinização), em média 60 dias após a semeadura. Foram coletadas cinco folhas-índices (folha oposta e abaixo a espiga) por subparcela nas duas linhas centrais, desprezando-se as plantas das bordas.

As amostras foram lavadas com água destilada e, em seguida, postas para secar em estufa com circulação forçada de ar a 60°C até peso constante. Depois foram trituradas em moinho de facas de aço inoxidável tipo Wiley, e armazenadas em potes universais para subsequentes análises químicas.

As soluções extratoras para as análises de N foram obtidas por digestão com peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico, e em seguida os teores de N total foram determinados pelo método de Kjeldahl (EMBRAPA, 2009).

Para determinação do teor de S, foi realizada a digestão via úmida (nítrico-perclórica) para obtenção das soluções extratoras. Os teores de S foram quantificados por meio da espectrofotometria de absorção molecular (EMBRAPA, 2009).

4.2.5 Produtividade de grãos

Para estimar a produtividade, foram colhidas manualmente as áreas úteis das subparcelas. No Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores as colheitas ocorreram em 12/11/2014 e 29/10/2015, e no Argissolo Acinzentado, em Umbaúba nos dias 25/11/2014 e 17/11/2015. Depois de colhidas, as espigas foram trilhadas mecanicamente e pesadas para a obtenção da massa de grãos. Em seguida efetuou-se a correção da umidade para 13% e padronizaram-se os resultados para a unidade de medida de um hectare.

4.2.6. Dose de máxima eficiência econômica (DMEE)

A dose de máxima eficiência econômica foi calculada apenas para a ureia perolada e o sulfato de amônio cristal, uma vez que essas fontes são as únicas que são comercializadas e, portanto, possuem preço de mercado. Para a sua determinação, igualou-se a derivada de cada equação de regressão da resposta produtiva (kg ha^{-1}) às doses de N (kg ha^{-1}) à relação entre o preço do nutriente ($\text{R\$ kg}^{-1}$) e o preço do produto ($\text{R\$ kg}^{-1}$).

Para isso, foi considerado no cálculo o preço da saca de 60 kg^{-1} de grãos de milho comercializado no Estado de Sergipe durante a época da colheita no ano de 2015, consultados pelo boletim de preços pago aos produtores (EMDAGRO, 2015). Os preços dos fertilizantes foram obtidos a partir de consulta à Fertilizantes Heringer, sem considerar o preço do frete (Tabela 4).

Tabela 4. Preços dos produtos praticados no Estado de Sergipe, 2015

Produtos	Preço das sacas	Preço unitário
Milho	R\$ 35,00 – 60 kg^{-1} de grãos	R\$ 0,58 kg^{-1} de grãos
Ureia perolada (UR)	R\$ 52,00 – 50 kg^{-1}	R\$ 2,31 kg^{-1} de N
Sulfato de amônio cristal (SA)	R\$ 40,00 – 50 kg^{-1}	R\$ 4,00 kg^{-1} de N

Fertilizantes Heringer - Rod. BR 101 km 66,5 s/n - Zona rural - Fazenda Jacuruna lote III. Rosário do Catete (SE).

4.2.7. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e comparação das médias pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$ para as fontes de N, e para as doses de N foi utilizado modelo de regressão de Mitscherlich (Eq. 1) para a variável produtividade, e regressão polinomial para os teores foliares de N e S.

$$\text{Eq. 1} \quad y = A (1 - e^{-c(x+b)})$$

Onde y representa a produtividade (kg ha^{-1}); A é a produção máxima (kg ha^{-1}); c é o coeficiente de eficácia do nutriente; x é a quantidade de N aplicada (kg ha^{-1}), e b é a quantidade do nutriente que o solo é capaz de fornecer (kg ha^{-1}) em forma assimilável pelas plantas (PIMENTEL GOMES, 1990). Testes de contrastes foram utilizados para comparação do tratamento testemunha vs tratamentos fertilizados na análise de variância para todas as variáveis.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Teor foliar de N

De acordo com o contraste testemunha vs tratamentos fertilizados, os teores foliares de N foram incrementados pela adubação nitrogenada. O teor de N foliar nas plantas não adubadas foi de $24,1 \text{ g kg}^{-1}$ no Argissolo Vermelho-Amarelo, e $20,2 \text{ g kg}^{-1}$ no Argissolo Acinzentado, e na média de todos os tratamentos adubados foi $34,4 \text{ g kg}^{-1}$ no Argissolo Vermelho-Amarelo, e $29,8 \text{ g kg}^{-1}$ no Argissolo Acinzentado, correspondendo a um aumento ($p < 0,05$) de 42,7 e 47,5%, respectivamente.

Comparados apenas os tratamentos que receberam adubações nas diferentes doses, a análise de variância indicou efeito ($p < 0,05$) de doses e ausência de efeitos de fonte e de sua interação com doses, nas safras de 2014 e de 2015, bem como na média destes dois anos, no Argissolo Acinzentado. Resultados similares foram encontrados no Argissolo Vermelho-Amarelo, exceto pela observação de interação significativa entre fonte e dose de fertilizantes em 2014. Os teores de N foliar obtidos com as diferentes fontes para as safras e solos estudados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Teor de nitrogênio na folha-índice do milho, na fase de embonecamento e polinização, em função do uso de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura no Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE), e no Argissolo Acinzentado em Umbaúba (SE), nas safras 2014, 2015, e na média dessas safras

Locais	Argissolo Vermelho-Amarelo			Argissolo Acinzentado		
	Safras	2014	2015	Média 2014-2015	2014	2015
Tratamentos	g kg ⁻¹					
TEST	22,0*	26,2*	24,1*	20,6*	19,8*	20,2*
UP	30,2	37,0 a	33,6 a	29,5 a	28,4 a	28,9 a
UP+S	32,0	35,9 a	33,9 a	28,4 a	28,6 a	28,5 a
UP+SA	34,2	37,5 a	35,9 a	32,5 a	28,0 a	30,3 a
UP+SA+S	32,0	35,7 a	33,9 a	29,1 a	27,9 a	28,5 a
UP+SA+Zn	32,1	35,6 a	33,8 a	31,9 a	29,1 a	30,5 a
UR	33,4	35,3 a	34,4 a	31,1 a	28,3 a	29,7 a
SA	32,6	38,7 a	35,6 a	33,7 a	30,7 a	32,2 a
Média	31,1	35,2	33,1	29,6	27,6	28,6
CV (a) %	11,2	12,2	9,4	14,6	6,8	9,9
CV (b) %	10,2	8,6	7,0	14,6	11,1	9,8

* indica diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade para o contraste testemunha vs tratamentos adubados. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (a) e CV (b) representam os coeficientes de variação das parcelas e subparcelas, respectivamente. Legenda: UP - ureia pastilhada pura; UP+S - ureia pastilhada com S elementar; UP+SA - ureia pastilhada com sulfato de amônio; UP+SA+S - ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar; UP+SA+Zn - ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco; UR - ureia perolada; SA - sulfato de amônio cristal.

Valderrama et al. (2014) também não encontraram efeito de fontes nos teores de N foliares ao aplicar N em cobertura na cultura do milho, utilizando a ureia convencional e a ureia revestida com polímeros, em duas safras consecutivas.

Nos tratamentos fertilizados, os teores de N variaram entre 27,9 e 38,7 g kg⁻¹. Todos os fertilizantes apresentaram uma boa capacidade de fornecer N às plantas, pois os valores obtidos encontram-se entre 27 e 35 g kg⁻¹ de N, faixa considerada adequada para a cultura do milho, segundo Raij; Cantarella (1996). Os teores de N foliares encontrados por Maestrello et al. (2014) em duas safras agrícolas, variaram de 25,1 a 26,9 g kg⁻¹ de N, tendo como fontes de N ureia e ureia revestida, não atingindo a faixa de suficiência de N foliar.

Porém, a testemunha apresentou teores de N abaixo dos considerados adequados, em virtude de os solos das áreas experimentais apresentarem baixos teores de matéria orgânica (Tabelas 1 e 2), que é a principal fonte de N do solo. A maioria dos solos brasileiros tem baixa disponibilidade natural de fornecimento de N, tornando-se crucial um aporte exógeno em quantidades adequadas para garantir o crescimento, o desenvolvimento e a produção da cultura do milho (BELARMINO et al., 2003).

O sulfato de amônio (SA) apresentou os maiores teores absolutos de N nas folhas em ambas as safras e locais estudados. Souza et al. (2011) que verificaram menores incrementos nos teores de N foliar em adubações com ureia do que com o sulfato de amônio.

As respostas dos teores foliares de N em função das doses de N aplicadas em cobertura, nas combinações de safra e solos nas quais não foram verificadas interação entre fonte e dose, são apresentadas nas Figuras 3A e 3B. Estas respostas se ajustaram significativamente as regressões quadráticas, exceto para o Argissolo Acinzentado na safra 2014 que o ajuste foi linear.

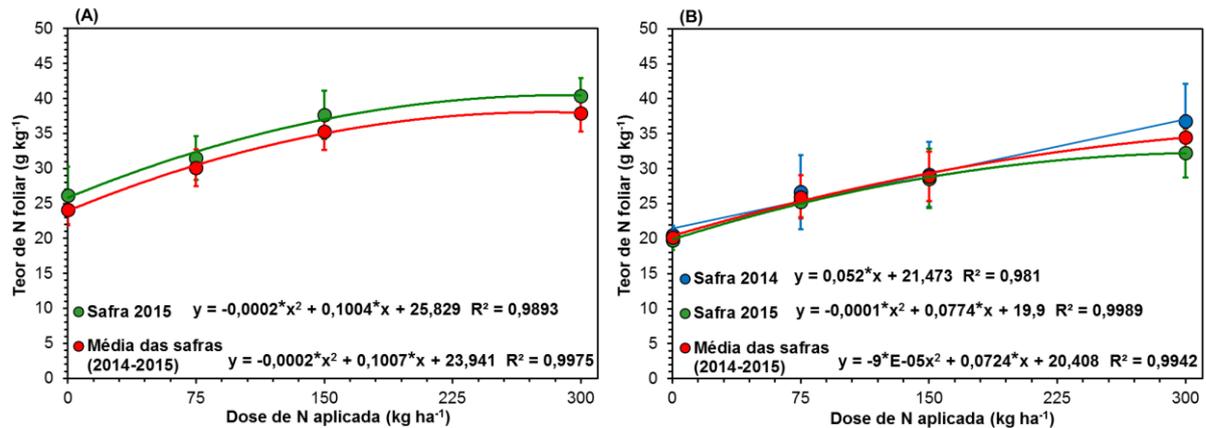
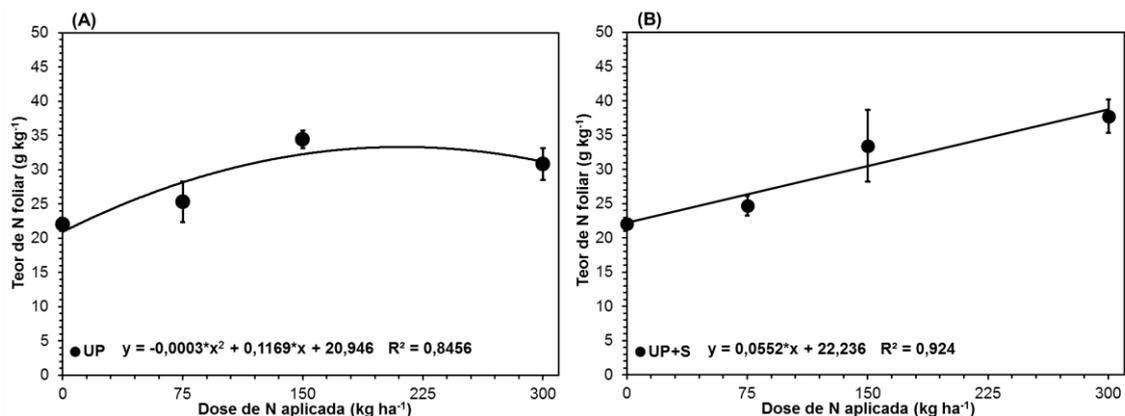


Figura 3. Respostas dos teores de N foliares às doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, no Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores, SE (A), na safra 2015 e na média das safras 2014-2015, e no Argissolo Acinzentado em Umbaúba, SE, (B) nas safras de 2014, 2015 e na média das safras 2014-2015. * indica que é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão.

Mota et al. (2015) observaram elevação linear no teor de N foliar em resposta a incrementos de doses de N no milho. Melo et al. (2011) e Souza et al. (2011) avaliando a resposta do incremento de doses de N, combinadas com distintas fontes e formas de aplicação de adubos nitrogenados, obtiveram elevação do N foliar com a elevação das doses seguindo a regressão polinomial quadrática.

Na Figura 4 é apresentado o desdobramento da interação dose x fonte, no Argissolo Vermelho-Amarelo na safra 2014.



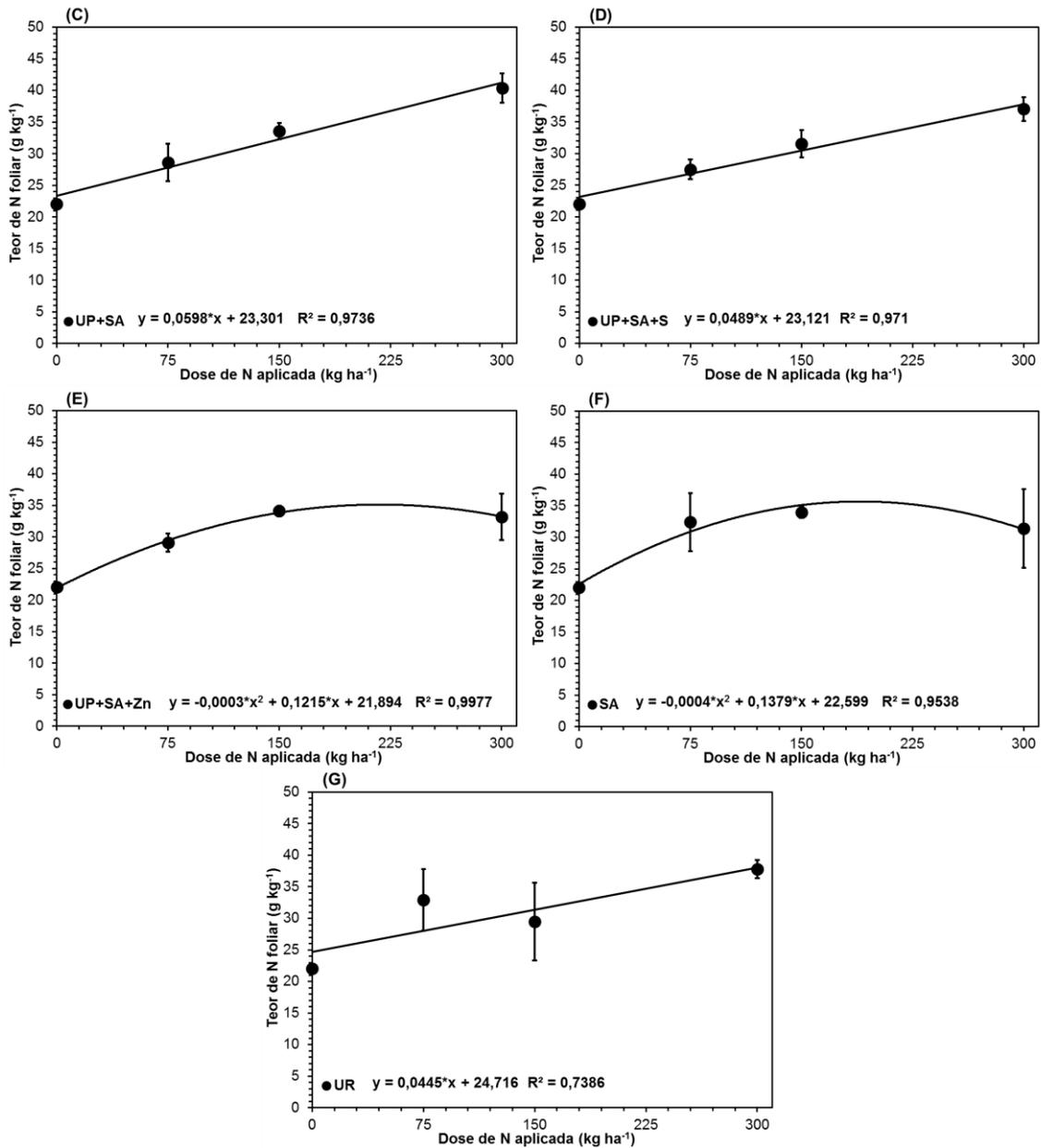


Figura 4. Desdobramento da interação doses x fontes de N, para o Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE) na safra de 2014. (A) – ureia pastilhada pura; (B) – ureia pastilhada com S elementar; (C) – ureia pastilhada com sulfato de amônio; (D) – ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar; (E) – ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco; (F) – ureia perolada; (G) sulfato de amônio cristal. * indica que é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão.

Os teores de N foliares se ajustaram significativamente as regressões polinomiais, sendo que quatro fontes (UP+S, UP+SA, UP+SA+S e UR) apresentaram o modelo linear, indicando que requereram doses continuamente maiores para aumento do N foliar. As demais fontes (UP, UP+SA+Zn e SA) se ajustaram ao modelo quadrático.

4.3.2. Teor foliar de S

Os teores foliares de S em função das doses de S aplicados em cobertura na média das safras 2014-2015 são apresentados nas Figuras 5A e 5B.

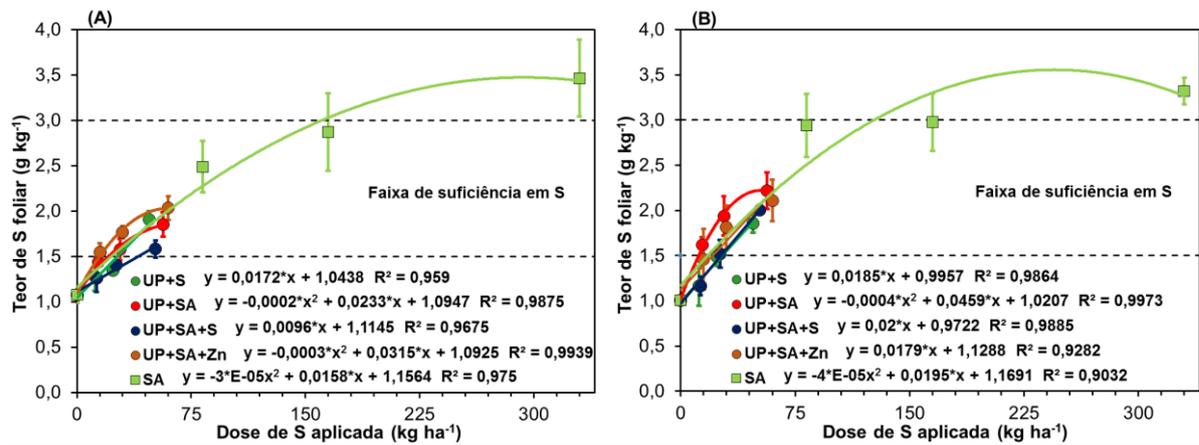


Figura 5. Respostas dos teores de S foliares em função das doses de S aplicados em cobertura no milho na média das safras 2014-2015. (A) – no Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE), (B) – no Argissolo Acinzentado em Umbaúba (SE). * indica que é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão.

Houve aumento significativo dos teores de S na folha-índice com o acréscimo das doses de S. O SA proporcionou os maiores teores de S em tecido foliar pelo fato deste fertilizante apresentar alto teor de S (22%). O conteúdo de N neste fertilizante é de 20%, sendo que para atender a uma dada recomendação de N é aplicado 1,1 vezes mais S que N (Tabela 6).

Coutinho Neto et al. (2011) encontraram resposta linear do teor de S nas folhas de milho em função das doses N tendo como fonte o sulfato de amônio devido à maior disponibilidade de S no solo.

De modo geral, todas as fontes que contém S em suas formulações foram capazes de elevar os teores de S para a faixa considerada adequada, que segundo Raji; Cantarella (1996) situa-se entre 1,5 e 3,0 g kg⁻¹ de S. Dentre os tratamentos pastilhados, a UP+SA e UP+SA+Zn, nas doses intermediárias foram capazes de atingir a faixa de suficiência em S, pelo fato de se ter aplicado mais S em cobertura utilizando estas fontes (Tabela 6). Pois, apesar de os fertilizantes pastilhados complexados com enxofre conterem o mesmo teor de S em suas formulações (7%), os teores de N são diferentes (Tabela 3). Portanto, para atender as doses de N testadas (75, 150 e 300 kg ha⁻¹ de N), foram aplicadas diferentes doses de S. Na Tabela 6 são apresentadas as quantidades aplicadas de S para atender as doses de N testadas.

Tabela 6. Quantidade de enxofre aplicado em função das doses de nitrogênio testadas

Doses de N aplicada -- kg ha ⁻¹ de N --	Fertilizantes				
	UP+S	UP+SA	UP+SA+S	UP+SA+Zn	SA
	kg de S aplicado ha ⁻¹				
75	11,9	14,1	12,9	15,0	82,5
150	23,7	28,2	25,8	30,0	165,0
300	47,4	56,5	51,6	60,0	330,0

Legenda: UP+S - ureia pastilhada com S elementar; UP+SA - ureia pastilhada com sulfato de amônio; UP+SA+S - ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar; UP+SA+Zn - ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco; SA - sulfato de amônio cristal.

Os teores de N e S devem estar em equilíbrio na planta e no solo, pois o aumento na produtividade do milho está intimamente ligado ao adequado suprimento de N e S para formação de aminoácidos e proteínas essenciais a planta (STIPP; CASARIN, 2010).

4.3.3. Produtividade de grãos

O manejo adotado no experimento para a adubação de cobertura é descrito por Coelho (2010), que recomenda que, quando na ausência de N na semeadura, a aplicação em cobertura

seja realizada até o estágio fenológico de 4 a 5 folhas, e corrobora com Silva et al. (2005a) que não encontraram diferenças significativas de produtividade entre a aplicação de toda recomendação de N em cobertura entre os estádios de 4 a 6 folhas e a aplicação do N em semeadura e cobertura.

Não houve interação significativa entre os fatores, apenas efeitos isolados dos mesmos, indicando que as fontes e as doses de N atuam de forma independente.

Pelo contraste entre a testemunha e os tratamentos adubados, verificou-se que os tratamentos fertilizados apresentaram produtividades superiores à testemunha. Portanto, ocorreram ganhos significativos de produtividade em resposta à adubação nitrogenada. Resultados experimentais obtidos por vários autores, em diversas condições de solo, clima e sistemas de cultivo, mostram respostas generalizadas do milho à adubação nitrogenada, sendo que cerca de 80% dos ensaios de adubação realizados com milho no Brasil respondem à aplicação de nitrogênio (CRUZ et al., 2005).

Tabela 7. Produtividade do milho em função do uso de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura em sistema de plantio convencional, no Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE), e no Argissolo Acinzentado em Umbaúba (SE), nas safras 2014, 2015, e na média das safras 2014-2015

Locais	Argissolo Vermelho-Amarelo			Argissolo Acinzentado		
	Safras	2014	2015	Média 2014-2015	2014	2015
Tratamentos	----- kg ha ⁻¹ -----					
TEST	1.829*	2.954*	2.391*	3.327*	2.603*	2.965*
UP	4.132 a	5.354 a	4.743 a	5.033 b	4.565 a	4.799 b
UP+S	4.071 a	5.721 a	4.896 a	4.898 b	5.071 a	4.985 b
UP+SA	4.995 a	6.137 a	5.566 a	5.363 ab	5.034 a	5.199 ab
UP+SA+S	4.562 a	5.423 a	4.993 a	5.244 ab	4.872 a	5.058 ab
UP+SA+Zn	4.762 a	5.396 a	5.079 a	5.035 b	5.170 a	5.103 ab
UR	4.535 a	5.532 a	5.033 a	5.268 ab	4.661 a	4.965 b
SA	5.013 a	6.007 a	5.510 a	6.311 a	5.503 a	5.907 a
Média	4.237	5.315	4.776	5.060	4.685	4.873
CV (a) %	34,2	15,8	23,2	27,6	17,7	10,7
CV (b) %	16,6	13,4	12,1	16,2	14,7	11,6

* indica diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade para o contraste testemunha vs tratamentos adubados. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (a) e CV (b) representam os coeficientes de variação das parcelas e subparcelas, respectivamente. Legenda: UP - ureia pastilhada pura; UP+S - ureia pastilhada com S elementar; UP+SA - ureia pastilhada com sulfato de amônio; UP+SA+S - ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar; UP+SA+Zn - ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco; UR - ureia perolada; SA - sulfato de amônio cristal. Média de produtividade na Safra 2014/2015: Sergipe = 3794 kg ha⁻¹; Nordeste = 2333 kg ha⁻¹; Brasil = 5396 kg ha⁻¹, e na Safra 2015/2016: Sergipe = 1718 kg ha⁻¹; Nordeste = 1484 kg ha⁻¹; Brasil = 4207 kg ha⁻¹ (CONAB, 2016).

No Argissolo Vermelho-Amarelo não houve diferença significativa entre as fontes de N testadas em todas as safras e tampouco na média destas. Goes et al. (2014) utilizando como fonte de N a ureia, o sulfato de amônio e o nitrato de amônio, também não observaram diferenças significativa na produtividade de grãos em sistema de plantio convencional em um Latossolo Vermelho. Da mesma forma, Kappes et al. (2014) trabalhando com ureia e sulfato de amônio na cultura do milho em sistema plantio direto na região do cerrado, também não verificaram diferenças significativas na produtividade.

Já no Argissolo Acinzentado, o tratamento SA se destacou, diferindo estatisticamente dos tratamentos UP, UP+S e UP+SA+Zn na safra 2014 e, na média das safras 2014-2015, dos tratamentos UP, UP+S e UR. Desta forma, na média das safras os tratamentos pastilhados que

continham sulfato de amônio em suas formulações não diferiram do tratamento SA. Assim como no Argissolo Vermelho-Amarelo, o SA e a UP+SA apresentaram as maiores produtividades absolutas. Estes tratamentos também apresentaram elevadas médias de teor de N foliar (Tabela 5).

Lara Cabezas et al. (2005) verificaram que a aplicação do sulfato de amônio, independentemente da época de aplicação (pré-semeadura e cobertura), proporcionou acréscimos significativos, em média de 847 kg ha⁻¹ de grãos de milho, em relação à aplicação da ureia. Soratto et al. (2010) observaram que a aplicação de N na forma de sulfato de amônio proporcionou maior produtividade de milho em relação à amiréia. Porém, não diferiu das fontes ureia e entec.

O sulfato de amônio tem uma maior eficiência nutricional, pois, além de ser fonte de enxofre (22%), este fertilizante só sofre perdas por volatilização da amônia quando o pH é superior a 7, já que, apenas em condições alcalinas, o amônio reage com a hidroxila formando a amônia que volatiliza. Porém esta situação é incomum em solos tropicais (SANGOI et al., 2003; CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Tais características proporcionam vantagens agrônômicas, levando, com frequência, a rendimentos mais elevados. Outra vantagem advinda do uso de sulfato de amônio diz respeito ao aumento da solubilidade do fósforo e do manganês no solo, melhorando o aproveitamento desses nutrientes pelas plantas e aumentando a produtividade das culturas (COLLAMER et al., 2007).

Avaliando o comportamento de fontes de N para a cultura do milho, Lara Cabezas et al. (2005) e Lara Cabezas e Couto (2007) verificaram que o sulfato de amônio proporcionou produtividades de milho superiores em relação à ureia, atribuindo os autores, como causa da resposta observada, ao S presente no sulfato de amônio. Malavolta et al. (1996) relata aumentos de até 21% na produtividade do milho em resposta a adubação com enxofre.

Batista (2016) em seu estudo no município de Luís Eduardo Magalhães (BA), com a cultura do milho em plantio direto, alcançou uma produtividade 33,9% maior com a utilização do sulfato de amônio em relação à testemunha, o sulfato de amônio também apresentou produtividade superior a ureia. Já no presente trabalho, na média das safras 2014-2015, houve incrementos de produtividade da ordem de 130% no Argissolo Vermelho-Amarelo e 99% no Argissolo Acinzentado com relação a testemunha, utilizando como fonte de N o sulfato de amônio, ou seja, ocorreram maiores rendimentos na cultura do milho em sistema de plantio convencional em resposta a adubação nitrogenada, deixando evidente a importância da aplicação de N neste sistema. Já Cancellier (2013) em seu estudo com diferentes fontes e níveis de N em sistema de plantio direto, constatou baixa resposta a aplicação de N em cobertura, ou seja, ocorreu um incremento de apenas 11% na produtividade com aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N em comparação com a testemunha. Dependendo do tempo de adoção do manejo do sistema de plantio direto e das condições locais, o caráter fonte de N da matéria orgânica predomina em relação ao caráter dreno, podendo inclusive não haver resposta à sua aplicação (BELOW, 2002).

Em relação às doses de N aplicadas em cobertura, a resposta do milho se ajustou significativamente à equação de Mitscherlich, conforme mostram as Figuras 6A e 6B. Pelos resultados obtidos observa-se que, em média, o Argissolo Vermelho-Amarelo e o Argissolo Acinzentado em seus estados naturais são capazes de suprir à cultura do milho o equivalente a 35,6 e 68,3 kg ha⁻¹ de N respectivamente, o que permite um rendimento de 2403 e 2943 kg ha⁻¹ de grãos.

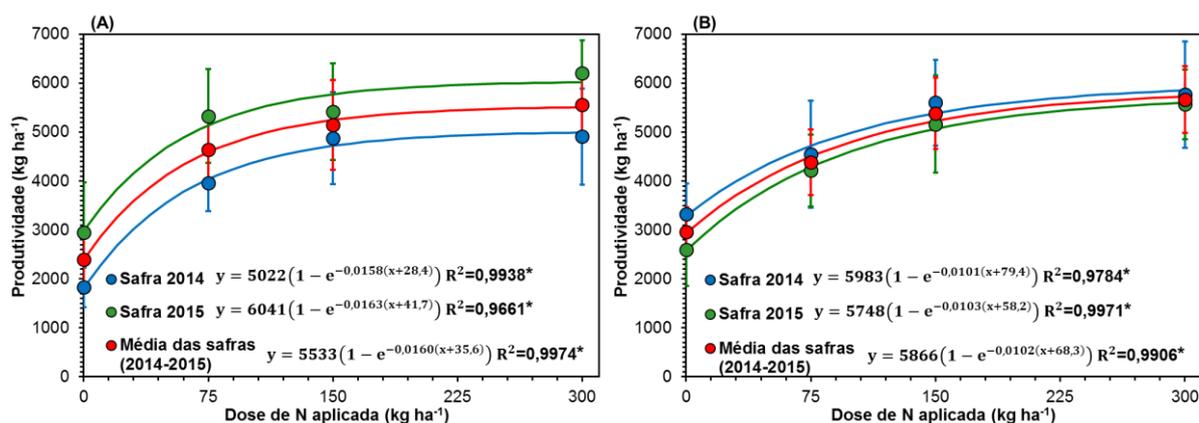


Figura 6. Produtividade de grãos de milho em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura ajustadas pela equação de Mitscherlich, no (A) Argissolo Vermelho-Amarelo em Nossa Senhora das Dores (SE), e no (B) Argissolo Acinzentado em Umbaúba (SE), nas safras de 2014, 2015 e na média das safras 2014-2015. * indicam que o ajuste da equação é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão.

Utilizando outros modelos de regressão, Mota et al. (2015) obtiveram um incremento linear no rendimento de grãos em resposta à elevação das doses de N aplicadas em cobertura, independentemente da fonte de N empregada, em dois anos agrícolas. Também, Soratto et al. (2011) e Gazola et al. (2014) avaliaram diferentes fontes e doses de N na cultura do milho e obtiveram uma elevação na produtividade de grãos com o aumento das doses que segue o modelo quadrático.

Quando se aumentam as doses de N em cobertura, o teor de N nas folhas também é aumentado, maximizando o processo fotossintético e, conseqüentemente, a produtividade de grãos (CAIRES et al., 2016).

Na safra 2015, o milho no Argissolo Vermelho-Amarelo apresentou uma maior resposta em produtividade em função das doses de N (Figura 6A), apresentando assim uma produtividade média maior neste ano, atingindo 5.315 kg ha⁻¹ de grãos (Tabela 7). Possivelmente, esse resultado é consequência da maior precipitação ocorrida desde a semeadura até a fase do florescimento nesta safra, e na melhor distribuição das chuvas no período de enchimento dos grãos, apesar da precipitação total ter sido menor que na safra anterior (Figura 1). Já no Argissolo Acinzentado, as curvas de resposta foram próximas, sendo que a safra 2014 foi a que obteve o maior efeito da adubação nitrogenada (Figura 6B), e conseqüentemente, uma maior produtividade média, alcançando 5.060 kg ha⁻¹ (Tabela 7). Neste ano, a precipitação foi maior (1.440 mm), principalmente na época do enchimento de grãos (Figura 2).

Considerando a equação da regressão no Argissolo Vermelho-Amarelo, na média das safras 2014-2015, houve uma maior resposta com o aumento da dose de N, pois o rendimento de grãos evoluiu de 2.403 kg ha⁻¹ na testemunha para 5.507 kg ha⁻¹ com aplicação de 300 kg ha⁻¹ de N em cobertura, e, no Argissolo Acinzentado, as produtividades observadas foram superiores, variando de 2.943 kg ha⁻¹ na testemunha até 5.729 kg ha⁻¹ na dose máxima. Doses mais altas de N mantêm as folhas fisiologicamente ativas por mais tempo, prolongando a duração do período de enchimento de grãos e favorecendo o rendimento da cultura (SILVA et al., 2005b).

O aumento no rendimento de grãos com o aumento da dose de N também é relatado em diversos trabalhos com a cultura do milho (FARINELLI; LEMOS, 2012; RIMSKI-KORSAKOV et al., 2012; SILVA et al., 2011), sendo que Gava et al. (2010) constataram que a elevação da dose de N aumentou a produtividade de milho, porém até a dose 200 kg ha⁻¹ de N. Em anos com condições climáticas são favoráveis à cultura do milho, a quantidade de N requerida para altas produtividades pode alcançar valores superiores a 150 kg ha⁻¹ (AMADO et al., 2002).

4.3.4. Eficiência econômica

Na média das safras 2014-2015, as respostas produtivas do milho à aplicação da ureia perolada e do sulfato de amônio também se ajustaram significativamente a lei dos rendimentos decrescentes, conforme mostra a Figura 7.

Deve se ter cautela para recomendar a dose de N a ser utilizada, haja vista que se subestimada, ocorrerá a redução da produtividade e, quando superestimada, diminuem a rentabilidade do produtor pelo gasto desnecessário com fertilizantes, além de afetar o meio ambiente, em consequência das perdas de N em decorrência do excesso disponível (ARGENTA et al., 2003).

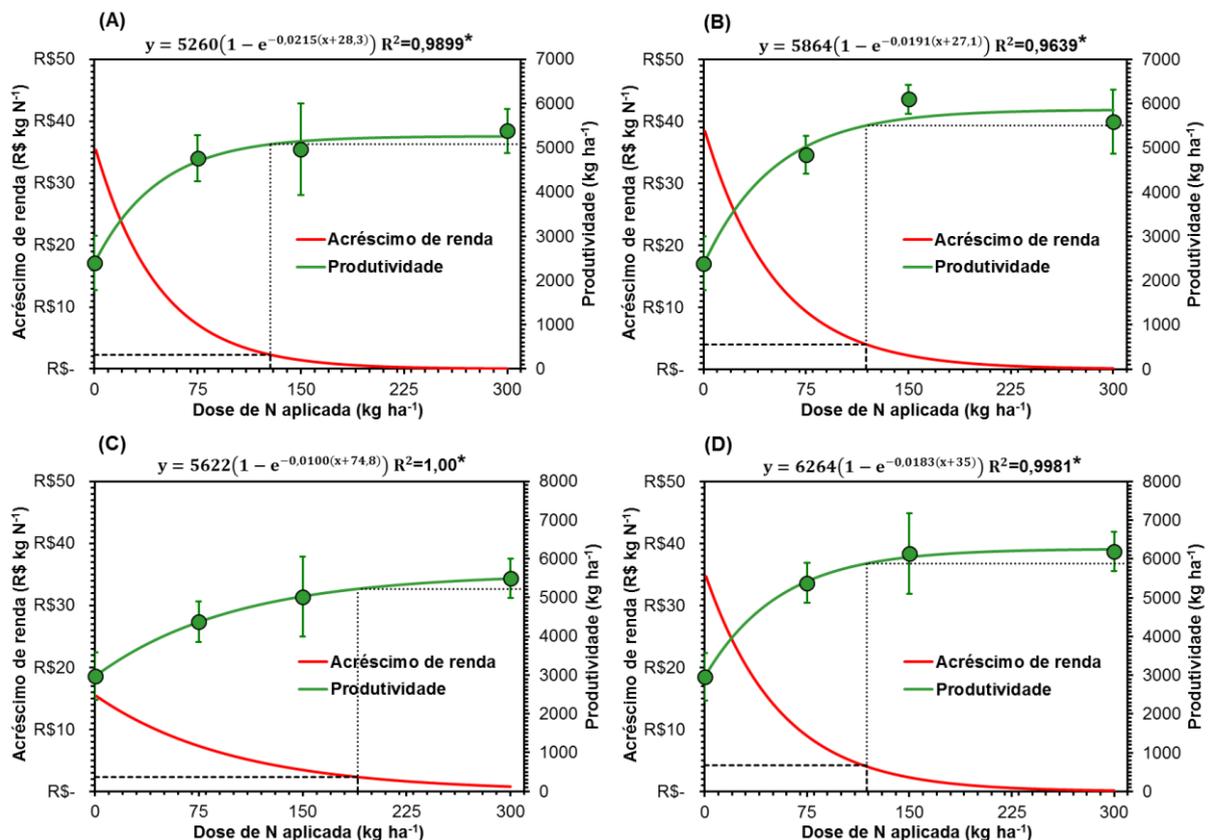


Figura 7. Efeitos da (A) ureia perolada e (B) sulfato de amônio cristal no Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores (SE), e (C) ureia perolada e (D) sulfato de amônio cristal no Argissolo Acinzentado, em Umbaúba (SE), na produtividade, acréscimos de renda e dose de máxima eficiência econômica da cultura do milho em resposta a adubação nitrogenada, na média das safras 2014-2015. * indicam que o ajuste da equação é significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. As barras indicam o desvio padrão.

Com base nos preços praticados em 2015, as doses de máxima eficiência econômica (DMEE), ou seja, a dose de N na qual os acréscimos na renda se igualam ao custo por unidade do nutriente aplicado são apresentadas na Tabela 8.

Em ambos os locais estudados, o SA foi o fertilizante que proporcionou as maiores receitas com a DMEE, mesmo sendo o produto com maior custo por unidade de N (R\$ 4,00 kg⁻¹ de N – Tabela 4). Tanto no Argissolo Acinzentado quanto no Argissolo Vermelho-Amarelo, a DMEE para o SA se deu com aplicação de 119 kg ha⁻¹ de N, possibilitando uma renda bruta de R\$ 3.193,48 ha⁻¹ no Argissolo Vermelho-Amarelo, e de R\$ 3.415,62 ha⁻¹ no Argissolo Acinzentado. De forma geral, os rendimentos econômicos no Argissolo Acinzentado foram superiores aos do Argissolo Vermelho-Amarelo (Tabela 8). Esse resultado é uma consequência direta da produtividade significativamente superior proporcionada pelo SA em relação a UR no Argissolo Acinzentado (Tabela 7), o que propiciou um maior acréscimo na renda (R\$ 383,96

ha⁻¹). No Argissolo Vermelho-Amarelo, apesar de não haver diferenças significativas de produtividade entre estes dois fertilizantes (Tabela 7), o SA proporcionou um acréscimo de 428 kg ha⁻¹ de grãos na DMME e um aumento de R\$ 248,24 ha⁻¹ de receita bruta em relação UR (Tabela 8).

Tabela 8. Dose de máxima eficiência econômica (DMEE), produtividade de grãos e rendas bruta e líquida do milho em função da aplicação de fertilizantes nitrogenados, no Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores (SE), e no Argissolo Acinzentado, em Umbaúba (SE), na média das safras 2014-2015

Argissolo Vermelho-Amarelo					
Fertilizante	¹ DMEE	Produtividade	Renda bruta	Custo com fertilizante	Renda líquida ²
	- kg N ha ⁻¹ -	- kg grãos ha ⁻¹ -	-- R\$ ha ⁻¹ --	-- R\$ ha ⁻¹ --	-- R\$ ha ⁻¹ --
UR	128	5.078	2.945,24	295,68	2.649,56
SA	119	5.506	3.193,48	476,00	2.717,48
Argissolo Acinzentado					
Fertilizante	¹ DMEE	Produtividade	Renda bruta	Custo com fertilizante	Renda líquida ²
	- kg N ha ⁻¹ -	- kg grãos ha ⁻¹ -	-- R\$ ha ⁻¹ --	-- R\$ ha ⁻¹ --	-- R\$ ha ⁻¹ --
UR	190	5.227	3.031,66	438,90	2.592,76
SA	119	5.889	3.415,62	476,00	2.939,62

¹DMEE - Dose de máxima eficiência econômica.

²Renda líquida, considerando apenas o custo com a compra do fertilizante.

Legenda: UR - ureia perolada; SA - sulfato de amônio cristal.

Queiroz et al. (2011) alcançaram a máxima eficiência econômica com a dose de 120 kg ha⁻¹ de N, que proporcionou um rendimento de 7.470 kg ha⁻¹ de grãos, independentemente da fonte utilizada. Pavinato et al. (2008) observaram a maior receita com a aplicação de 158 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, que permitiu uma produtividade de 6.228 kg ha⁻¹ de grãos. Civardi et al. (2011) demonstraram que a utilização de 120 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia proporcionou o maior rendimento, receita bruta e lucro quando comparada a ureia revestida com polímeros.

No presente estudo, as DMEE para a UR foram diferentes para os locais estudados, isso pode ser atribuído ao fato de a ureia ser a fonte de N mais susceptível a perdas por volatilização, podendo os fatores ambientais de cada local terem determinado esta variação. Já o SA não houve variação de doses, por ser uma fonte menos susceptível à volatilização.

Cruz et al. (2008) estudando 5 cultivares de milho, e utilizando como fonte de N o sulfato de amônio, obteve a DMEE com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N para as cultivares DKB-395, DOW-8550, TRACTOR e AG-9010, e 116 kg ha⁻¹ de N para a cultivar AL-34. Sendo que as cultivares AG-9010 e a DOW-8550 apresentaram as maiores receitas, assim, a produtividade e consequentemente o maior rendimento econômico foi determinado pelo potencial genético da cultivar. Ainda, Silva et al. (2014) alcançaram a DMEE com a aplicação 70 kg ha⁻¹ de N que proporcionou uma produtividade de 7.406 kg ha⁻¹ de grãos, utilizando o sulfato de amônio em cobertura.

Considerando a receita líquida, o tratamento SA necessitou de um investimento maior na compra de fertilizante na DMEE (R\$ 476,00 ha⁻¹ – Tabela 8). No Argissolo Vermelho-Amarelo, proporcionou um acréscimo no lucro de R\$ 67,92 ha⁻¹, e no Argissolo Acinzentado de R\$ 346,86 ha⁻¹ em relação a UR. A tomada de decisão quanto a fonte de N que seja mais viável economicamente irá depender de outras variáveis como custos com transporte, estocagem e aplicação, sendo que para essa recomendação da DMEE é necessário 595 kg ha⁻¹ de SA, e 284 e 422 kg ha⁻¹ de UR, no Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Acinzentado, respectivamente.

O consumo aparente de ureia em 2015 foi da ordem de 4,13 milhões de toneladas, contra 1,98 milhões de toneladas de sulfato de amônio, ou seja, o consumo da ureia foi em torno de duas vezes maior que o do sulfato de amônio (IPNI, 2016). De acordo com Cantarella (2007b), os fatores que fazem com que o sulfato de amônio tenha seu consumo reduzido são o baixo teor de N em relação à ureia, proporcionando um maior custo por unidade de N, além da baixa disponibilidade do adubo na forma granulada.

4.4. Conclusões

O acréscimo das doses de N aumenta os teores foliares deste nutriente, independentemente da fonte de N utilizada, quando em aplicação única em cobertura. O incremento de doses de S em cobertura no milho aumenta o teor de S foliar.

Sem aplicação de fertilizantes nitrogenados, o Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores fornece 35,6 kg ha⁻¹ de N à cultura do milho, e o Argissolo Acinzentado em Umbaúba supre 68,3 kg ha⁻¹ de N, o que proporcionam produtividades de 2.403 e 2.943 kg ha⁻¹ de grãos, respectivamente.

A adubação nitrogenada, aplicada em dose única em cobertura, aumenta a produtividade do milho em sistema plantio convencional, no Argissolo Vermelho-Amarelo e no Argissolo Acinzentado, sendo o incremento de produtividade decrescente com o aumento das doses.

As doses recomendadas de máxima eficiência econômica para a UR são 128 kg ha⁻¹ de N no Argissolo Vermelho-Amarelo, e de 190 kg ha⁻¹ de N Argissolo Acinzentado.

Para o SA as doses indicadas são 119 kg ha⁻¹ de N para ambos os solos. No Argissolo Acinzentado, há um maior acréscimo na renda bruta em função das doses de N. O SA proporciona as maiores rendas com a dose de máxima eficiência econômica.

4.5. Referências Bibliográficas

Amado TJC, Mielniczuk J, Aita C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. *Rev Bras Cienc Solo*. 2002;26:241-248. doi: 10.1590/S0100-06832002000100025

Argenta G, Silva PRF, Fosthofer EL, Strieder ML, Suhre E, Teichmann LL. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. *Rev Bras Cienc Solo*. 2003;27:109-119. doi: 10.1590/S0100-06832003000100012

Batista JN. Desempenho agrônomo da cultura do milho e impacto ambiental em função do uso de fertilizantes nitrogenados nas condições de Cerrado do Oeste baiano [Dissertação]. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; 2016.

Belarmino MCJ, Pinto JC, Rocha GP, Ferreira Neto AE, Morais AR. Altura de perfilho e rendimento de matéria seca de capim-tanzânia em função de diferentes doses de superfosfato simples e sulfato de amônio. *Ciênc agrotec*. 2003;27:879-885. doi: 10.1590/S1413-70542003000400021

Below FE. Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada do milho. Piracicaba: IPNI; 2002. p. 7-12.

Caires EF, Milla R. Adubação nitrogenada em cobertura para o cultivo de milho com alto potencial produtivo em sistema de plantio direto de longa duração. *Bragantia*. 2016;75:87-95. doi: 10.1590/1678-4499.160

Cancellier EL. Eficiência da ureia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solo de fertilidade construída [Dissertação]. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2013.

Cantarella H, Duarte AP. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: Galvão JCC, Miranda GV, editores. Tecnologia de produção de milho. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2004. p.139- 182.

Cantarella H. Nitrogênio. In: Novais RF, Alvarez V, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007a. p. 375-470.

Cantarella, H. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados: Uso eficiente de nitrogênio em novos fertilizantes no Brasil. Piracicaba: IPNI; 2007b. p.12-13.

Cantarella H, Montezano ZF. Nitrogênio e enxofre. In: Prochnow LI, Casarin V, Stipp SR, editores. Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes: nutrientes. Piracicaba: IPNI; 2010. p. 5-46.

Civardi EA, Silveira Neto NA, Ragagnin VA, Godoy ER, Elias B. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. Pesq Agropec Trop. 2011;41:52-59. doi: 10.5216/pat.v41i1.8146

Coelho AM. Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo; 2007. (Circular técnica 96).

Coelho AM. Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho. 23ª ed. Jornal Eletrônico da Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas; 2010.

Collamer JD, Gearhart M, Monesmith FL. Sulfato de Amônio. Piracicaba: IPNI; 2007. p. 7-8, 2007.

Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, 12ª levantamento, setembro/2012. Brasília, DF: 2012.

Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, 12ª levantamento, setembro/2013. Brasília, DF: 2013.

Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, 12ª levantamento, setembro/2014. Brasília, DF: 2014.

Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, 12ª levantamento, setembro/2015. Brasília, DF: 2015.

Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, 12ª levantamento, setembro/2016. Brasília, DF: 2016.

Coutinho Neto AM, Coutinho ELM, Orioli Júnior V, Corá JE, Bueno CRP, Silva ARB. Adubação com ureia e sulfato de amônio no milho cultivado sob sistema semeadura direta. Nucleus. 2011;8:393-404. doi: 10.3738/nucleus.v8i1.544

Cruz JC, Pereira FTF, Pereira Filho IA, Coelho AM. Resposta de cultivares de milho à adubação nitrogenada em cobertura. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo; 2005. (Comunicado Técnico, 116).

Cruz SCS, Pereira FRS, Santos JR, Albuquerque AW, Pereira RG. Adubação nitrogenada para o milho cultivado em sistema plantio direto, no Estado de Alagoas. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*. 2008;12:62-68. doi: 10.1590/S1415-43662008000100009

Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe – Emdagro [internet]. Preços médios pagos pelos produtores – mensal/2015; 2015 [acesso em 18 jun 2016]. Disponível em: <http://www.emdagro.se.gov.br/modules/tinyd0/index.php?id=57>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; 2009.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Sistema Brasileiro de Classificação do Solo. 3ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2013.

Farinelli R, Lemos LB. Nitrogênio em cobertura na cultura do milho em preparo convencional e plantio direto consolidados. *Pesq Agropec Trop*. 2012; 42:63-70. doi: 10.1590/S1983-40632012000100009

Gava GJC, Oliveira MW, Silva MA, Jerônimo EM, Cruz JCS, Trivelin PCO. Produção de fitomassa e acúmulo de nitrogênio em milho cultivado com diferentes doses de 15N-uréia. *Semin: Cien Agrar*. 2010;31:851- 862. doi: 10.5433/1679-0359.2010v31n4p851

Gazola D, Zucareli C, Silva RR, Fonseca ICB. Aplicação foliar de aminoácidos e adubação nitrogenada de cobertura na cultura do milho safrinha. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*. 2014;18:700-707 . doi: 10.1590/S1415-43662014000700005

Goes RJ, Rodrigues RAF, Takasu AT, Arf O. Fontes e doses de nitrogênio em cobertura para a cultura do milho em espaçamento reduzido. *Rev Agrarian*. 2014;7:257-263.

Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerring J, Moller SI, White P. Functions of macronutrients. In: Marschner, P. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. New York: Elsevier; 2012. p.135-189.

International Fertilizer Industry Association - Ipn [internet]. Consumo aparente de fertilizantes e matérias-primas em 2015; 2015. [acesso em 15 jun 2016]. Disponível em: <http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132>

Kappes C, Arf O, Dal Bem EA, Portugal JR, Gonzaga AR. Manejo do nitrogênio em cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto. *Rev Bras Milho e Sorgo*. 2014;13:201-217. doi: 10.18512/1980-6477/rbms.v13n2p201-217

Lara Cabezas WAR, Trivelin PCO, Kondörfer GH, Pereira S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). *Rev Bras Cienc Solo*. 2000;24:363-376. doi: 10.1590/S0100-06832000000200014

Lara Cabezas WAR, Arruda MR, Cantarella H, Pauletti V, Trivelin PCO, Bendassolli JA. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou

cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. *Rev Bras Cienc Solo*. 2005;29:215-226. doi: 10.1590/S0100-06832005000200007

Lara Cabezas WAR, Couto PA. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. *Rev Bras Cienc Solo*. 2007;31:739-752. doi: 10.1590/S0100-06832007000400015

Malavolta E. Informações agronômicas sobre nutrientes para as culturas - Nutri-fatos. Piracicaba: Potafos;1996.

Malavolta E. Manual de nutrição de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres; 2006.
Maestrello PR, Buzetti S, Teixeira Filho MCM, Garcia CMP, Rodrigues MAC, Lino ACM, Andreotti M. Aplicação de ureia revestida em cobertura no milho irrigado sob sistema de semeadura direta. *Rev Bras Ciênc Agrár*. 2014;9:192-199. doi:10.5039/agraria.v9i2a3708

Melo FB, Corá JE, Cardoso MJ. Fertilização nitrogenada, densidade de plantas e rendimento e milho cultivado no sistema plantio direto. *Rev Ciênc Agron*. 2011;42:27-31.

Morais TP, Brito CH, Ferreira AS, Luz JMQ. Aspectos morfofisiológicos de plantas de milho e bioquímico do solo em resposta à adubação nitrogenada e à inoculação com *Azospirillum brasilense*. *Rev. Ceres*. 2015;62:589-596. doi: 10.1590/0034-737X201562060012

Mota MR, Sangoi L, Schenatto DE, Giordani W, Boniatti CM, Dall'igna L. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. *Rev Bras Cienc Solo*. 2015;39:512-522. doi: 10.1590/01000683rbc20140308

Pavinato OS, Caretta CA, Giroto E, Moreira ICL. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. *Ciênc Rural*. 2008;38:358-364. doi: 10.1590/S0103-84782008000200010

Pimentel Gomes F. Curso de estatística experimental. 13ª ed. Piracicaba: Nobel; 1990.

Queiroz AM, Souza CHE, Machado VJ, Lana RMQ, Korndorfer GH, Silva AA. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea mays* L.). *Rev Bras Milho e Sorgo*. 2011;10:257-266. doi: 10.18512/1980-6477/rbms.v10n3p257-266

Raij BV, Cantarella H. Cereais. In: Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC, e ditores. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2ª ed. Campinas: IAC; 1996. (IAC Boletim Técnico, 100).

Rimski-Korsakov H, Rubio G, Lavado RS. Fate of the nitrogen from fertilizers in field-grown maize. *Nutr Cycl Agroecosys*. 2012;93:253-263. doi: 10.1007/s10705-012-9513-1

Sangoi L, Ernani PR, Lech VA, Rampazzo C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da ureia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. *Ciênc Rural*. 2003;33:65-70. doi: 10.1590/S0103-84782003000100010

Sangoi L, Ernani PRF. Maize response to nitrogen fertilization timing in two tillages system in a soil with high organic matter content. *Rev Bras Cienc Solo*. 2007;31:507-517. doi: 10.1590/S0100-06832007000300011

- Silva EC, Buzetti S, Lazarini E. Aspectos econômicos da adubação nitrogenada na cultura do milho em sistema de plantio direto. *Rev Bras Milho e Sorgo*. 2005a;4:286-297. doi: 10.18512/1980-6477/rbms.v4n3p286-29
- Silva PRF, Strieder ML, Coser RPS, Rambo L, Sangoi L, Argenta G, Forsthofer EL, Silva AA. Grain yield and kernel protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dresses. *Sci Agri*. 2005b; 62:487-92. doi: 0.1590/S0103-90162005000500014
- Silva EC, Muraoka T, Buzetti S, Trivelin PCO. Manejo de nitrogênio no milho em Latossolo Vermelho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura. *Pesq Agropec Bras*. 2006;41:477-486. doi: 10.1590/S0100-204X2006000300015
- Silva DRG, Pereira AF, Dourado RL, Silva FP, Ávila FW, Faquin V. Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under diferente levels of urea and NBPT-treated urea. *Ciênc Agrotec*. 2011;35:516-523. doi: 10.1590/S1413-70542011000300012
- Silva GF, Oliveira FHT, Pereira RG, Silva PSL, Diogenes TBA, Silva ARC. Doses de nitrogênio e fósforo para produção econômica de milho na Chapada do Apodi, RN. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*. 2014;18:1247-1254. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v18n12p1247-1254
- Soratto RP, Pereira M, Costa TAM, Lampert VN. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. *Rev Ciênc Agron*. 2010;41:511-518. doi: 10.1590/S1806-66902010000400002
- Soratto RP, Silva AH, Cardoso SM, Mendonça CG. Doses e fontes alternativas de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo arenoso. *Ciênc Agrotec*. 2011;35:62-70. doi: 10.1590/S1413-70542011000100007
- Souza JA, Buzetti S, Teixeira Filho MCM, Andreotti M, Sá ME, Arf O. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha irrigado em plantio direto. *Bragantia*. 2011;70:447-454. doi: 10.1590/S0006-87052011000200028
- Stipp SR, Casarin V. A importância do enxofre na agricultura brasileira. Piracicaba: IPNI; 2010. p. 14-20. (Informações Agronômicas, 129).
- United States Department of Agriculture - USDA. Crop Production 2015. Washington: Summary January; 2016.
- Valderrama M, Buzetti S, Teixeira Filho MCM, Benett CGS, Andreotti M. Adubação nitrogenada na cultura do milho com ureia revestida por diferentes fontes de polímeros. *Semin: Cien Agrar*. 2014;35:659-670. doi: 10.5433/1679-0359.2014v35n2p659

5. ARTIGO 2

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA E VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA DE FORMULAÇÕES DE UREIA PASTILHADA E COMPLEXADA COM ENXOFRE E ZINCO NA CULTURA DO MILHO

Periódico a ser submetido: Revista Brasileira de Ciência do Solo

RESUMO

O pastilhamento da ureia pode ter efeito quanto as perdas por volatilização de N, em virtude do maior tamanho do grânulo e pela associação com nutrientes que acidificam o solo. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes fontes de nitrogênio na volatilização da amônia, nutrição mineral em N e produtividade do milho em sistema de plantio convencional. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com 3 repetições, e os tratamentos foram: ureia pastilhada pura (UP), ureia pastilhada com S elementar (UP+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio (UP+SA), ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar (UP+SA+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco (UP+SA+Zn), ureia perolada (UR) e sulfato de amônio cristal (SA), aplicados em cobertura na dose de 150 kg ha⁻¹ de N, além da testemunha (TEST). Do total de amônia volatilizada, 92,5% das perdas foram observados até o quinto dia após a adubação. A UP+SA reduziu a volatilização da amônia, não diferindo estatisticamente do SA e do TEST. O SA apresentou ainda produtividade superior ao tratamento UP+SA+S. O teor foliar de N correlacionou-se positivamente e a taxa de volatilização, negativamente, com a produtividade de grãos. Para cada kg de N-NH₃ perdido por volatilização houve uma redução de 16,8 kg ha⁻¹ na produtividade de grãos.

Palavras-chave: Fertilização, nitrogênio, perdas de N-NH₃, *Zea mays* L.

ABSTRACT

Agronomic efficiency and ammonia volatilization from urea pastilles formulations with sulfur and zinc in maize cropping

Urea pastillation may have an effect on N losses through volatilization due to the greater size of the granule and the association with soil acidifying nutrients. The objective of this work were to evaluate the effects of different sources of nitrogen on the volatilization of ammonia, N mineral nutrition in yield of maize cultivated using conventional tillage. The experimental design was Complete Blocks with 3 replicates and the treatments were: pastille urea (UP), pastille urea with elemental S (UP+S), pastille urea with ammonium sulfate (UP+SA), pastille urea with ammonium sulfate and elemental S (UP+SA+S), pastille urea with ammonium sulfate and zinc sulfate (UP+SA+Zn), prilled urea (UR), ammonium sulfate (SA) applied at 150 kg ha⁻¹ of N, in addition to the control (TEST). Of the total ammonia volatilized, 92.5% of the losses were observed during the first five days after fertilization. The UP+SA reduced ammonia volatilization, not statistically differing from SA and TEST. The SA presented higher yield than UP+SA+S. Leaf N content was positively correlated and the rate of volatilization, negatively, with grain yield. For each kg of N-NH₃ lost by volatilization a reduction of 16.8 kg ha⁻¹ in grain yield was observed.

Key-words: Fertilization, nitrogen, losses of N-NH₃, *Zea mays* L.,

5.1. Introdução

A cultura do milho é altamente exigente em nitrogênio, o que torna esse nutriente o mais limitante à produção quando não suprido de forma adequada (COSTA et al., 2012). Na maioria dos solos brasileiros, a disponibilidade natural de nitrogênio é insuficiente para assegurar altas produtividades, tornando-se crucial um fornecimento exógeno em quantidades adequadas para garantir o crescimento, desenvolvimento e a produção das plantas de milho (BELARMINO et al., 2003).

Devido à dinâmica do N no ambiente, o manejo da fertilização nitrogenada é complexo (SCHIAVINATTI et al., 2011). Por isto, o domínio do conhecimento relacionado a fertilizantes e fertilização nitrogenada é essencial para aumentar a eficiência agrônômica (PRANDO et al., 2013).

A fonte de nitrogênio mais utilizada na agricultura brasileira é a ureia, seguida do sulfato de amônio. A ureia tem como vantagem a elevada concentração de N ($\pm 45\%$) o que reduz custos com transporte e aplicação. Por outro lado, apresenta grande potencial de perda de N-NH₃ por volatilização (FONTOURA; BAYER, 2010). Essas perdas podem variar de 40 a 78% quando aplicada na superfície de solos cultivados com milho (LARA CABEZAS; COUTO, 2007).

A volatilização da amônia é influenciada pelas práticas de manejo, as características de solo e as condições climáticas, outro fator determinante é a fonte de N empregada (CANTARELLA, 2007).

Em razão das elevadas perdas de N, surge a necessidade do desenvolvimento e avaliação de novos fertilizantes, os quais apresentem maior eficiência para minimizar as perdas ambientais, ao mesmo tempo em que proporcionam um melhor desempenho agrônômico para as culturas (TANG et al., 2009).

Visando aumentar a eficiência da adubação nitrogenada, as indústrias de fertilizantes têm desenvolvido diversos produtos que atuam liberando o nitrogênio de forma gradual, como os fertilizantes recobertos com substâncias orgânicas, inorgânicas ou resinas sintéticas. Essas substâncias podem ser poliamidas, enxofre elementar ou ainda, polímeros das mais diversas naturezas (QUEIROZ et al., 2011). Além de fertilizantes com diferentes tamanhos de grânulos, como a ureia perolada (1,6 mm) e a granulada (3 mm), existe também a ureia na forma

pastilhada (3 mm), a qual ainda não se encontra disponível no mercado brasileiro. O tamanho do grânulo da ureia pode induzir à menor taxa de liberação do nutriente e, conseqüentemente, diminuir as suas perdas, seja por volatilização e, ou, lixiviação, ocasionando assim maior aproveitamento do N pelas plantas (OLIVEIRA et al., 2014).

O processo de pastilhamento da ureia permite a complexação com outros elementos como enxofre e zinco. A união deste adubo com fontes de enxofre, seja na forma de enxofre elementar ou sulfato de amônio, pode garantir à ureia vantagens similares às aquelas apresentadas pelo sulfato de amônio, tanto em termos de suprimento de enxofre quanto na redução da volatilização.

Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de fontes de nitrogênio convencionais, e na forma de ureia pastilhada e em sua complexação com enxofre (enxofre elementar e sulfato de amônio) e zinco na eficiência agrônômica e na volatilização da amônia na cultura do milho em sistema de plantio convencional, nas condições edafoclimáticas da região do Médio Sertão sergipano.

5.2. Material e Métodos

5.2.1. Descrição da área de estudo

O experimento foi instalado no Campo Experimental Jorge Sobral da Embrapa Tabuleiros Costeiros, localizada no município de Nossa Senhora das Dores (SE). As coordenadas geográficas do local são 10°27'S e 37°11'O e altitude média de 200 m acima do nível do mar. O solo da área experimental é um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argilosa e de relevo ondulado (EMBRAPA, 2013). A temperatura média anual é de 26°C e precipitação de 1082 mm, sendo que mais de 70% das chuvas ocorrem no período de março a agosto (Figura 1). As características químicas e físicas do solo da área experimental são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas e físicas do Argissolo Vermelho-Amarelo da área experimental após a calagem, em Nossa Senhora das Dores (SE)

Características químicas												
Profundidade	pH (H ₂ O)	¹ MO - g kg ⁻¹ -	P ---- mg dm ⁻³ ----	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Na	² SB	³ T	⁴ V
												- % -
0-20 cm	5,9	16,3	6,2	35,9	24,2	18,8	11,9	0,3	1,3	45,3	57,2	79,2
20-40 cm	5,8	12,9	2,4	16,8	21,9	16,6	12,0	0,2	0,9	39,8	51,8	76,8

Características físicas				
Profundidade	Areia	Silte	Argila	Classe textural
		g kg ⁻¹		
0-20 cm	552	183	265	Franco argilo arenosa
20-40 cm	489	194	317	Franco argilo arenosa

¹MO: matéria orgânica; ²SB: soma de bases trocáveis; ³T: capacidade de troca catiônica potencial; ⁴V: índice de saturação por base. Métodos de análise: pH (H₂O); MO (colorimetria); P, K e Na (Mehlich 1); Al, Ca e Mg (KCl 1 mol L⁻¹); H+Al (acetato de cálcio); textura (método do densímetro).

Na Figura 1 é apresentada a distribuição mensal das chuvas no Campo Experimental da Embrapa Tabuleiros Costeiros, no município de Nossa Senhora das Dores (SE).

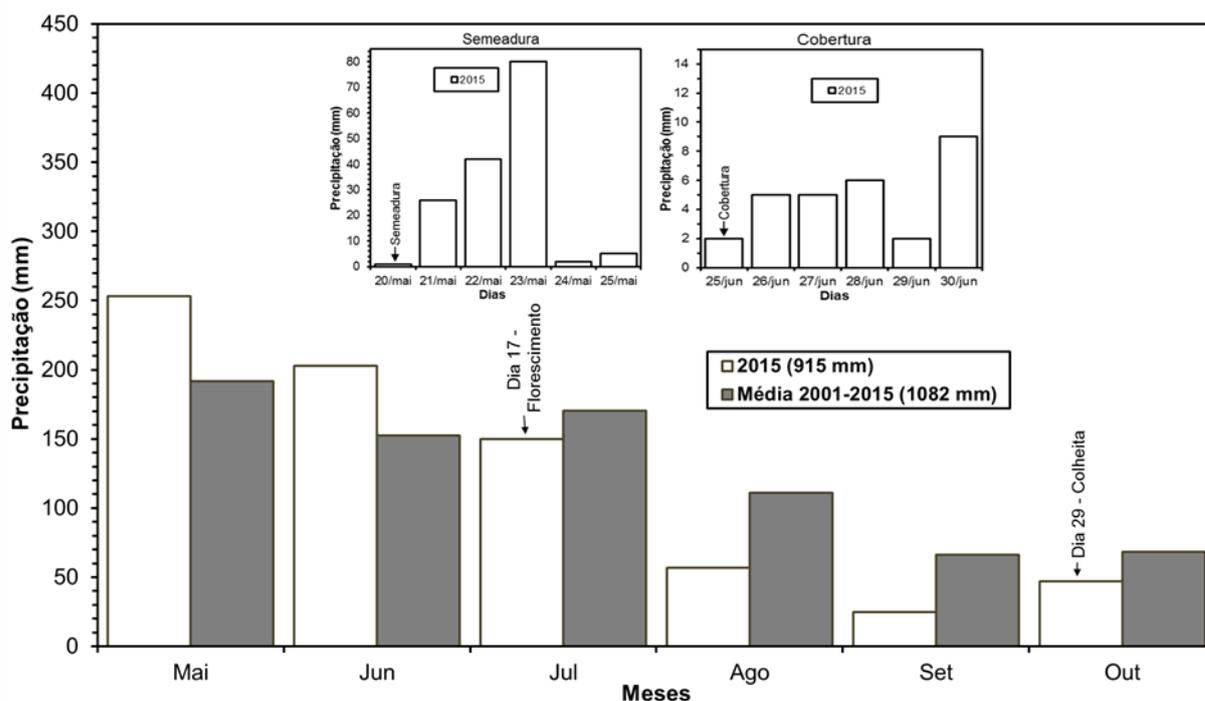


Figura 1. Precipitação mensal durante o ciclo vegetativo no ano de 2015, e média de precipitação mensal do período 2001-2015. As datas do florescimento e da colheita são indicadas pelas setas sobre as barras de precipitação. Nos detalhes são apresentadas as precipitações nos primeiros dias após sementeira do milho (A), e após a cobertura com fertilizantes nitrogenados (B), no município de Nossa Senhora das Dores (SE).

5.2.2. Delineamento experimental e formulações dos produtos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC), com oito tratamentos e três repetições. Os tratamentos foram: ureia pastilhada pura (UP), ureia pastilhada com S elementar (UP+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio (UP+SA), ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar (UP+SA+S), ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco (UP+SA+Zn), ureia perolada (UR), sulfato de amônio cristal (SA), e testemunha (TEST - sem aplicação de N). Na Tabela 2 é apresentada a descrição dos fertilizantes.

Tabela 2. Descrição dos fertilizantes e teores de nutrientes

Fertilizantes	Código	N %	S %	Zn %
Ureia pastilhada pura	UP	44,9	-	-
Ureia pastilhada com S elementar	UP+S	44,3	7	-
Ureia pastilhada com sulfato de amônio	UP+SA	37,2	7	-
Ureia pastilhada com sulfato de amônio e S elementar	UP+SA+S	40,7	7 (50% SA e 50% S)	-
Ureia pastilhada com sulfato de amônio e sulfato de zinco	UP+SA+Zn	35	7	1
Ureia perolada	UR	45,9	-	-
Sulfato de amônio cristal	SA	20	22	-

Legenda: S - enxofre elementar; SA - sulfato de amônio.

Cada parcela, com dimensões de 2m x 5m (10 m²) foi composta por quatro linhas de plantio, sendo consideradas como área útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,5 m de extremidade de cada linha. As parcelas foram separadas uma das outras por duas linhas de bordadura.

Os tratamentos foram aplicados em cobertura aos 36 dias após o plantio, quando as plantas encontravam-se no estágio V5, na dose de 150 kg ha⁻¹ de N.

Como o experimento foi semeado mecanicamente, para garantir que a testemunha não recebesse N, e que a única fonte externa de N fosse dos produtos a serem testados, o nitrogênio

não foi aplicado na adubação de plantio. Este manejo é descrito por Coelho (2010), que recomenda que, quando na ausência de N na sementeira, a aplicação em cobertura seja realizada até o estágio fenológico de 4 a 5 folhas, e corrobora com Silva et al. (2005) que não encontraram diferenças significativas em produtividade entre a aplicação de toda recomendação de N em cobertura entre os estádios de 4 a 6 folhas, e a aplicação do N em sementeira e cobertura.

5.2.3. Implantação do experimento

Em 2014 foram aplicados na área experimental 1.200 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, sendo este incorporado a 20 cm de profundidade.

O preparo do solo incluiu uma gradagem pesada e duas passagens com grade niveladora, sendo uma passada no sentido transversal e outra no sentido longitudinal às linhas de plantio.

A sementeira ocorreu de forma mecanizada no dia 20/05/2015, utilizando uma sementeira-adubadora pneumática da marca Jumil, modelo 2670 Pop Exacta Air, com quatro linhas, tracionadas por um trator New Holland modelo TM 165 - 4x4. Foi utilizado nas sementeiras o híbrido simples AG 7088 VT PRO MAX®, com densidade de sementeira de 74.000 sementes por hectare distribuídas num espaçamento entre linhas de 0,5 m e profundidade de sementeira de 5 cm.

A adubação de plantio constou da aplicação de 43,64 kg ha⁻¹ de P na forma de superfosfato triplo (244 kg ha⁻¹ do produto), e 66,41 kg ha⁻¹ de K na forma de cloreto de potássio (133 kg ha⁻¹ do produto), sendo o adubo depositado 5 cm abaixo, e 5 cm ao lado da semente.

A emergência das plantas ocorreu em média aos seis dias após a sementeira.

Após 30 dias da sementeira, foi aplicado o herbicida glifosato na dose de 1.440 g do i.a. ha⁻¹ para controle de plantas daninhas. Não foi necessário nenhum controle fitossanitário.

5.2.4. Volatilização da amônia (NH₃)

Foram utilizadas câmaras coletoras com sistema semiaberto livre estático (SALE) para capturar a amônia perdida por volatilização, adaptado e calibrado por Araújo et al. (2009). A câmara em questão é confeccionada a partir de garrafas PET de 2 litros, possuindo 10 cm de diâmetro com área de 0,008 m², sendo seu fundo retirado e utilizado como cobertura, formando uma espécie de campânula, que impede a contaminação da amostra com água da chuva e impurezas. No interior da garrafa um arame é posicionado de maneira a funcionar como suporte para o pote plástico de 50 mL utilizado para o acondicionamento da amostra e para o suporte da espuma de poliuretano usada para capturar o nitrogênio volatilizado. Esta espuma de 3 mm de espessura, 2,5 cm de largura e 25 cm de comprimento, foi previamente banhada com solução de 10 mL de H₂SO₄ - 1 mol L⁻¹ + glicerina 2% (v/v).

Após a aplicação dos tratamentos de forma homogênea, foram colocadas duas câmaras (SALE) dentro de cada parcela, de acordo com a metodologia de Araújo et al. (2009). Uma das câmaras foi disposta na entrelinha e a outra na linha de plantio (entre plantas). A cada coleta as câmaras eram mudadas de local dentro da parcela, a fim de representar todas as influências inerentes à volatilização. As espumas captadoras de N-NH₃ foram trocadas a cada coleta e acondicionadas em potes de 50 mL.

A análise da amônia capturada pelas lâminas da espuma foi realizada transferindo-se a espuma com a solução ácida remanescente no frasco de 50 mL para um erlenmeyer de 250 mL onde foram adicionados 50 mL de água destilada. O erlenmeyer com a solução diluída foi agitada a 220 rpm por 15 min em agitador horizontal. Após a agitação, foi transferida uma alíquota de 5 mL para um tubo de digestão, sendo destilada em sistema semi-micro Kjeldhal e titulada com ácido sulfúrico a 0,015 N, seguindo a metodologia descrita por Alves et al. (1994). Obtidos os valores de ácido sulfúrico gasto na titulação, das amostras e do branco, calculou-se o N amoniacal volatilizado. A taxa de volatilização foi calculada e em seguida realizada a integração dos fluxos encontrados.

As coletas foram realizadas no 1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 7º, 9º, 13º, 18º e 22º dia após a adubação em cobertura.

5.2.5. Teor de nitrogênio foliar

As amostras de folha foram coletadas quando o milho estava no início do estágio R1 (embonecamento e polinização). Foram coletadas cinco folhas-índices (folha oposta e abaixo a espiga) por parcela.

As amostras de folha foram lavadas com água destilada, postas para secar em estufa com circulação forçada a 60°C até peso constante, trituradas em moinho de facas de aço inoxidável tipo Wiley e armazenadas em potes universais para análises químicas subsequentes.

As soluções extratoras para as análises de N foram obtidas por digestão com peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico, e em seguida determinados os teores de N total pelo método de Kjeldahl (EMBRAPA, 2009).

5.2.6. Produtividade de grãos

Para a estimativa da produtividade, foram colhidas manualmente a área útil das parcelas no dia 29/10/2015. Depois de colhidas, as espigas foram trilhadas mecanicamente e pesadas para a obtenção da massa de grãos. Em seguida efetuou-se a correção de umidade para 13% e padronizaram-se os resultados para a unidade de medida padrão de um hectare.

5.2.7. Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e, no caso de observação de ausência de normalidade estes foram transformados pela \sqrt{x} . Em seguida, os dados foram submetidos a análise de variância e comparação das médias pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$, e análise de correlação de Pearson.

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1. Perdas de N por volatilização da amônia

Os fluxos diários de amônia volatilizada após a aplicação dos diferentes produtos são apresentados na Figura 2. Observa-se que no dia anterior a aplicação dos fertilizantes ocorreu uma precipitação de 15 mm. Assim, a adubação foi realizada sob uma condição de solo úmido, associado a uma chuva de 2 mm no mesmo dia. Essas precipitações já foram suficientes para promover a hidrólise das ureias perolada e pastilhada em suas complexações, pois no primeiro dia após a fertilização já foram detectados picos de volatilização. Isso ocorreu devido a ureia ser o fertilizante mais solúvel (119 g 100 mL⁻¹ de água) e sua hidrólise se iniciar imediatamente após o contato com o solo úmido (DA ROS et al., 2005). O teor de água do solo é um fator importante na hidrólise da ureia. Quando o solo está seco, a atividade da urease é baixa (ROCHETTE et al., 2009) e, desta forma menores volatilizações ocorrem (TASCA et al., 2011). Porém, com o incremento da umidade do solo, a atividade enzimática aumenta, pois, a adição de água promove o aumento da difusão da ureia e, conseqüentemente, maior contato com a urease existente no solo (SAVANT et al., 1987). De maneira geral, a hidrólise pode ocorrer em solos com níveis de umidade variada e, quanto mais rápida a hidrólise, maior o potencial de perda de amônia (DUARTE et al., 2007).

Devido a esta condição, a volatilização foi mais intensa durante os 5 primeiros dias após a fertilização especialmente para as formulações a base de ureia. Para estas formulações, observou-se que mais de 90% das perdas por volatilização foram concentradas neste período, corroborando com Rojas et al. (2012) que verificaram que a intensidade máxima de perdas de N-NH₃ ocorre até o quinto dia após a adubação. Estes resultados confirmam que qualquer prática que vise o controle da perda de N-NH₃ pela aplicação de ureia deve ser realizada logo após a sua aplicação.

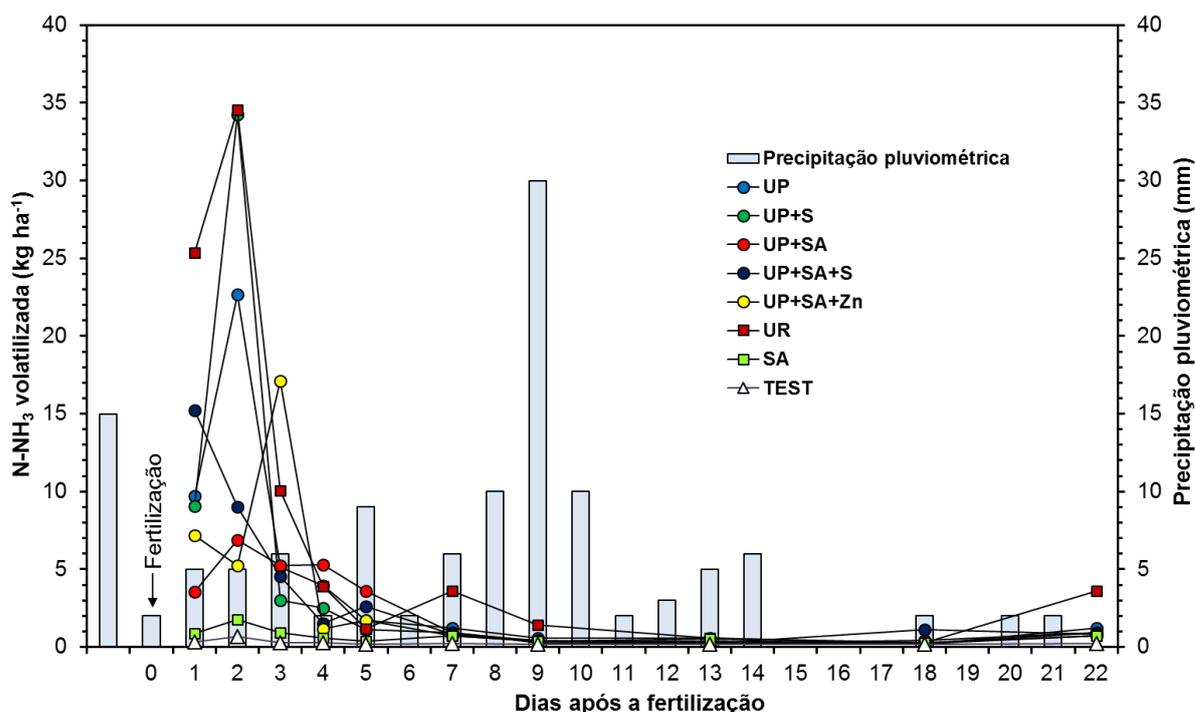


Figura 2. Fluxos diários da volatilização da amônia até o 22º dia após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados em cobertura na dose de 150 kg ha⁻¹ de N, na cultura do milho em sistema de plantio convencional, no município de Nossa Senhora das Dores (SE) em 2015.

Dentre as ureias pastilhadas, a UP+SA foi a que apresentou as menores perdas (24,7 kg de N-NH₃ ha⁻¹ do N aplicado). Já a UP+S, apresentou a maior variação da dinâmica da volatilização entre os fertilizantes testados, sendo que, do primeiro ao segundo dia, perdeu o equivalente a 24,8 kg ha⁻¹ de N-NH₃, ou, 49,7% do N aplicado, seguido de uma queda acentuada no fluxo de N-NH₃ no dia seguinte. Também os tratamentos UR e UP, tiveram a mesma tendência em relação aos fluxos diários.

A UP+SA+S foi a formulação pastilhada que mais volatilizou no primeiro dia (15 kg ha⁻¹ de N-NH₃), porém nos dias seguintes houve uma queda gradativa do fluxo de volatilização, e o tratamento UP+SA+Zn, foi o fertilizante que mais atrasou o pico de volatilização, que ocorreu no terceiro dia após a adubação. Isso porque este fertilizante foi o que apresentou a menor porcentagem de N, 35% (Tabela 2), precisando de um volume maior de fertilizante para atender a recomendação de 150 kg ha⁻¹ de N, isso pode ter retardado a hidrólise da ureia, pela urease no solo.

As perdas acumuladas de N-NH₃ são apresentadas na Figura 3. A UR foi o tratamento que mais perdeu N por volatilização (81,8 kg ha⁻¹ de N-NH₃ do N aplicado), enquanto a UP+SA, o SA e a testemunha apresentaram as menores perdas, sendo que para UP+SA, as perdas ocorridas não diferiram estatisticamente do SA e da testemunha. De acordo com Vitti et al. (2002), a mistura de ureia e sulfato de amônio reduz a volatilização da amônia devido a diminuição do pH do solo com a adição de sulfato de amônio na mistura com ureia. Da mesma forma, Oliveira et al. (2014) demonstraram a eficiência da compactação da ureia e sulfato de amônio contra as perdas de N-NH₃, reduzindo em até 29% a volatilização quando comparada com a ureia granulada comercial, em condição de ambiente controlado.

Entre os tratamentos com formulações pastilhadas, a ureia em sua forma pura (UP) apresentou os mesmos efeitos que as ureias em suas formas complexadas com enxofre e zinco (UP+S, UP+SA, UP+SA+S e UP+SA+Zn), quanto à volatilização. Enquanto que, as ureias pastilhadas complexadas com enxofre na forma de sulfato de amônio (UP+SA, UP+SA+S e UP+SA+Zn), apresentaram perdas por volatilização que não diferiram estatisticamente do SA.

O pH do solo é outro fator que influencia nas perdas de nitrogênio por volatilização. Portanto, o uso de fertilizantes acidificantes como o sulfato de amônio em mistura com ureia

pode diminuir as perdas de $N-NH_3$ pela neutralização da elevação do pH provocado pela hidrólise da ureia no local da aplicação (VILLAS BÔAS et al., 2005).

Vale ressaltar que a ureia pastilhada complexada é resultante da fusão da ureia com outros elementos em um único grânulo na forma de pastilha (3 mm). Assim, estes resultados sugerem que a complexação da ureia com o sulfato de amônio apresenta efeitos semelhantes à mistura em grânulos separados; porém, com a vantagem de facilitar a aplicação por apresentarem granulometria uniforme e por diminuir a segregação.

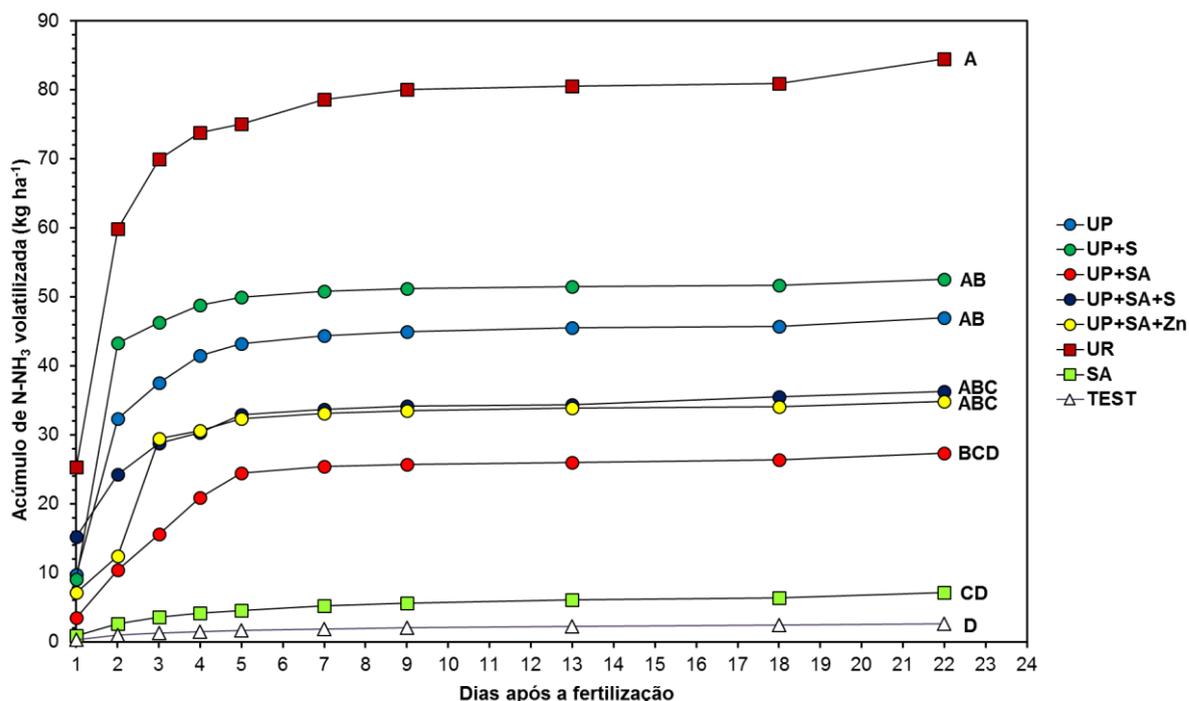


Figura 3. Quantidade acumulada de amônia volatilizada até o 22º dia após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados em cobertura na dose de 150 kg ha^{-1} de N, na cultura do milho em sistema de plantio convencional, no município de Nossa Senhora das Dores (SE) em 2015. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = 23,6 %.

A UP apresentou uma volatilização de $N-NH_3$ 44,4% menor, ou seja, $37,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N a menos que a UR. Apesar disso, não foram detectadas diferenças significativas entre estes tratamentos. De acordo com Stafanato et al. (2013), a ureia pastilhada não apresentou efeito positivo quanto a forma do grânulo sobre a volatilização de $N-NH_3$, uma vez que esse produto apresentou perda de 45,7% do N aplicado, não diferindo da ureia granulada (46,6%). Já adição dos micronutrientes Cu e B no processo de pastilhamento da ureia reduziu as perdas de amônia por volatilização quando comparadas com a ureia granulada, em condições de ambiente controlado. Souza (2015) também relatou que o tipo de acabamento (perolada e granulada) utilizado nos processos de produção da ureia não interferiu nas perdas acumuladas de $N-NH_3$ por volatilização.

Dos 150 kg de N aplicados na adubação de cobertura por hectare, foram perdidos via volatilização de $N-NH_3$, 54,6; 33,3; 29,5; 22,5; 21,4; 16,5 e 3% de N advindos da UR, UP+S, UP, UP+SA+S, UP+SA+Zn, UP+SA, e SA, respectivamente. Do tratamento sem fertilização (TEST) foi perdido um montante de $2,65 \text{ kg ha}^{-1}$ de $N-NH_3$, nitrogênio este possivelmente proveniente da mineralização da matéria orgânica do solo ou residual de fertilizações anteriores.

Lara Cabezas et al. (2000), avaliando as perdas de $N-NH_3$ em sistema de plantio direto, encontraram perdas de 54% do total de N aplicado na forma de ureia. Os autores observaram ainda que a incorporação da ureia na profundidade de 5-7 cm reduziu estas perdas para 5%.

O SA foi o fertilizante que perdeu menos N em termos absolutos, já que este fertilizante só sofre volatilização em solos alcalinos. Nestas condições, o amônio (NH_4^+) reage com a hidroxila (OH^-), formando água e NH_3 que volatiliza, situação incomum nos solos brasileiros (SANGOI et al., 2003; CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). O pH do solo no presente estudo foi de 5,9, fato que explica a baixa volatilização do N neste tratamento.

Trabalhos realizados anteriormente com sulfato de amônio e nitrato de amônio na cultura do milho também reportaram menores perdas de N-NH_3 em comparação a ureia (LARA CABEZAS et al., 2000; FONTOURA; BAYER, 2010; NASCIMENTO et al., 2013; STAFANATO et al., 2013). Os fertilizantes amoniacais quando aplicados sob restos de culturas e em solos ácidos ($\text{pH} < 7,0$) apresentaram perdas por volatilização de N-NH_3 menores do que 2% (CONTIN, 2007).

5.3.2. Teor de N em tecido foliar

Os teores foliares de N foram influenciados pela adubação nitrogenada (Figura 4), desta forma os tratamentos fertilizados apresentaram médias superiores à testemunha, mas não diferiram entre si. Da mesma forma, Goes et al. (2013) relataram que a aplicação de N em cobertura promove acréscimos do teor de N foliar, e Gazola et al. (2014) encontraram a menor quantidade de N foliar no tratamento testemunha, $18,3 \text{ g kg}^{-1}$.

Com relação as fontes de N, Schiavinatti et al. (2011) não encontraram diferenças significativas nos teores de N foliar ao aplicar o N em cobertura na cultura do milho, utilizando como fontes o sulfonitrato de amônio com inibidor de nitrificação, sulfato de amônio e ureia. Também, Galindo et al. (2016) não constataram diferenças significativas entre os fertilizantes Super N e ureia, quanto ao teor de N foliar.

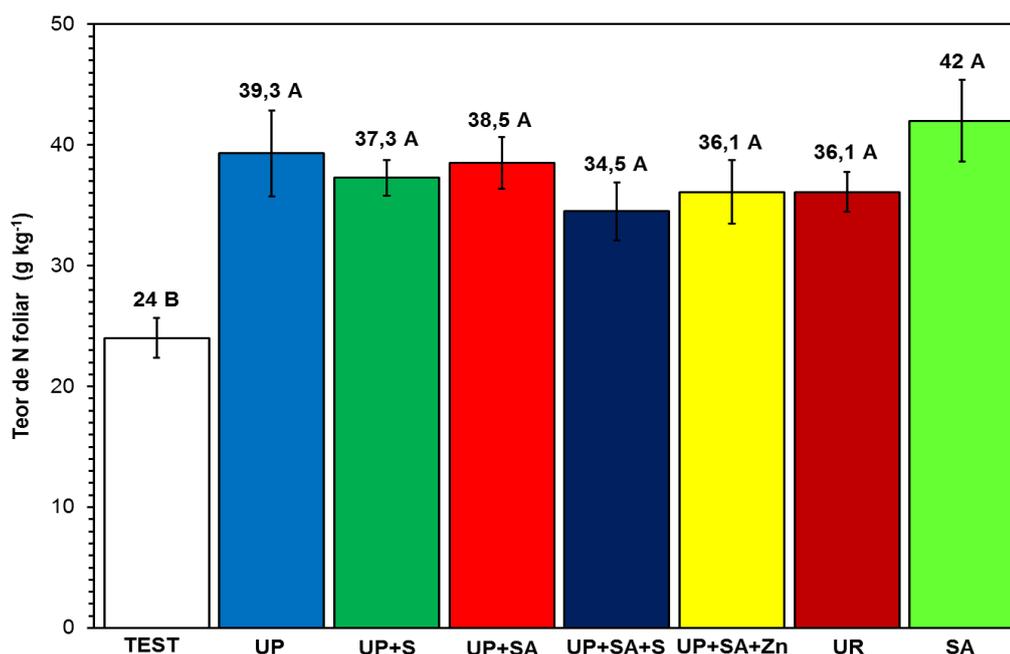


Figura 4. Teor de nitrogênio na folha-índice do milho em sistema de plantio convencional, submetido a dose de 150 kg ha^{-1} de N em cobertura, em Nossa Senhora das Dores (SE), 2015. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro indicam o desvio padrão. $\text{CV} = 7,8\%$.

Os teores foliares analisados para os tratamentos adubados estão dentro ou acima dos teores considerados adequados para a cultura do milho, que são de 27 a 35 g kg^{-1} de N (RAIJ; CANTARELLA, 1996), exceto para a testemunha que apresentou deficiência em N. Este resultado atesta que a quantidade de N fornecida pelo solo à cultura não foi suficiente para a uma nutrição adequada em N (MORAIS et al., 2015).

Mota et al. (2015) utilizaram como fontes de N a ureia comum, ureia com inibidor da urease, ureia com inibidor da nitrificação e nitrato de amônio não encontraram diferenças significativas entre estes tratamentos quanto ao teor de N foliar, porém as quantidades encontradas foram abaixo dos teores adequados, que variaram de 17 a 24 g kg⁻¹, em dois anos agrícolas.

Em termos absolutos o SA apresentou o teor de N nas folhas mais elevado e, dentre as ureias pastilhadas, se destaca a UP+SA, com 38,5 g kg⁻¹ de N em tecido foliar. Vale ressaltar que estes tratamentos também foram aqueles que apresentaram as menores taxas de volatilização (Figura 3). Porém, como não houve diferenças significativas entre os teores foliares de N, a volatilização não influenciou significativamente esta variável, apresentando apenas tendências, como mostra a Figura 5, em que não foi encontrada correlação significativa entre a volatilização da amônia e o teor de N na folha. Corroborando com Faria (2013) que verificou que as quantidades de N perdidas por volatilização não foram suficientes para influenciar os teores foliares de N.

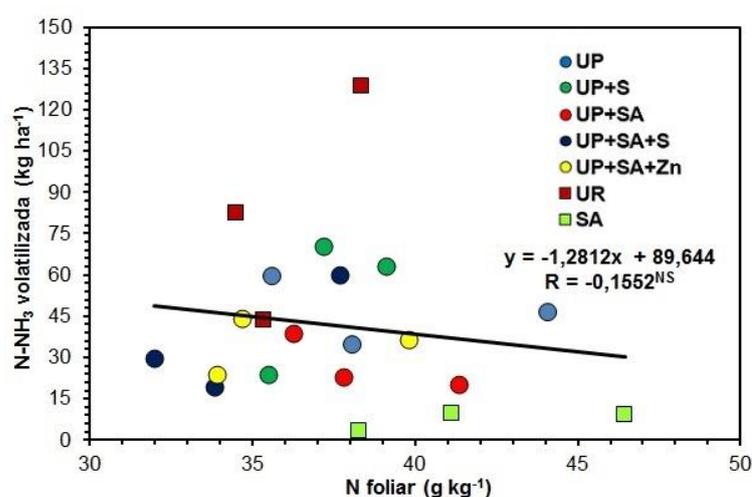


Figura 5. Correlação entre a volatilização de N-NH₃ e o teor de N foliar, na cultura do milho submetido a dose de 150 kg ha⁻¹ de N em cobertura, sob sistema de plantio convencional, no município de Nossa Senhora das Dores (SE) em 2015. NS - não significativo pelo teste t a 5% de probabilidade.

5.3.3. Produtividade

Para a produtividade de grãos, houve efeito significativo da adubação nitrogenada em relação à testemunha (Figura 6), reflexo da nutrição deficiente em N conforme atesta o teor de N foliar abaixo do adequado (Figura 4). O milho é uma cultura que responde à aplicação da adubação nitrogenada com incremento em várias características que influenciam a produção final (MORAIS et al., 2015).

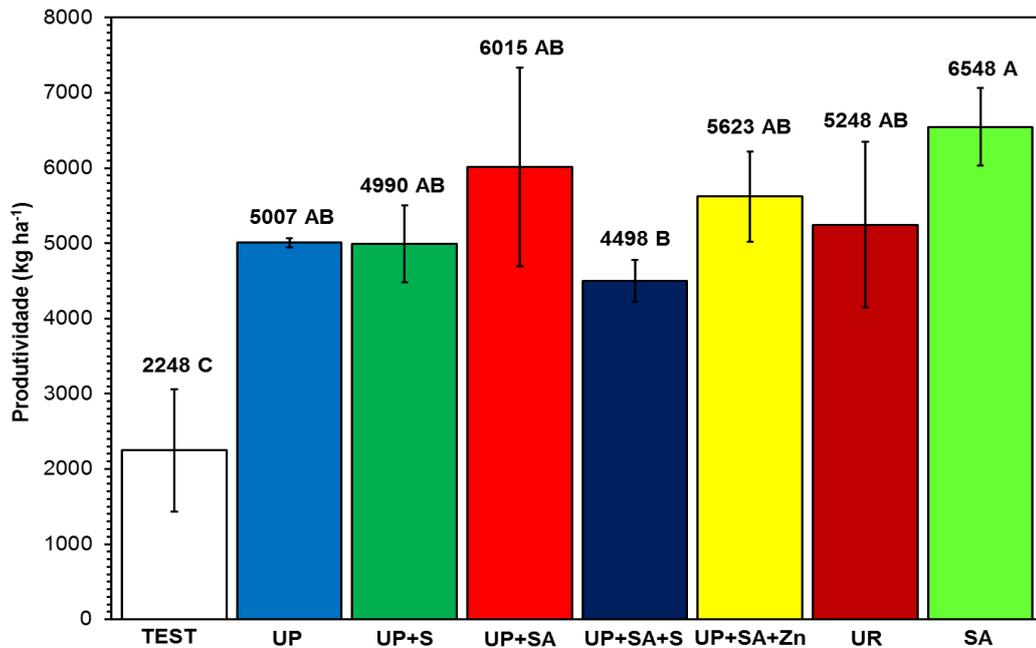


Figura 6. Produtividade de grãos de milho, submetido a dose de 150 kg ha^{-1} de N em cobertura, sob sistema de plantio convencional, no município de Nossa Senhora das Dores (SE) em 2015. Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As barras de erro indicam o desvio padrão. CV = 13,1%.

Entre os tratamentos fertilizados, o sulfato de amônio apresentou uma produtividade significativamente superior ao tratamento UP+SA+S. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças significativas entre eles. Esse resultado pode ser atribuído, à melhor nutrição em N do tratamento SA, sendo que a UP+SA+S apresentou a nutrição mais deficitária ($34,5 \text{ g kg}^{-1}$) entre os tratamentos fertilizados (Figura 4). Este fato pode ter afetado significativamente a produtividade, apesar de não serem observadas diferenças significativas para os teores de N, e os valores serem considerados adequados quanto a nutrição mineral. Isso, por existir uma correlação linear significativa entre o teor de N foliar e a produtividade de grãos, como mostra a Figura 7A.

A relação entre teor de N na folha e rendimento de grãos de milho é bem conhecida (WASKOM et al., 1996). Silva et al. (2009) e Costa et al. (2012) obtiveram coeficientes de correlação de 0,88, e 0,75 entre o rendimento de grãos e o teor de N da folha-índice, respectivamente.

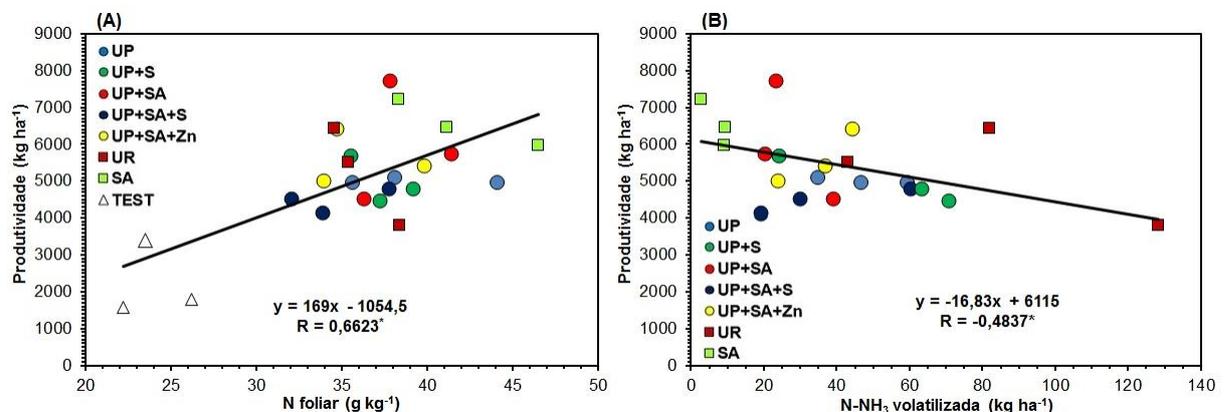


Figura 7. (A) - Correlação entre produtividade de grãos e teor de N foliar; (B) - correlação entre produtividade de grãos e volatilização da amônia. * indica que é significativo pelo teste t a 5% de probabilidade.

A produtividade de grãos apresentou correlação negativa moderada com a volatilização de N-NH₃. Portanto, a volatilização teve impacto significativo no rendimento de grãos de milho (Figura 7B).

O fato de o SA ter apresentado perdas de N-NH₃ que não diferem estatisticamente do tratamento UP+SA+S, e haver diferenças significativas para produtividade entre esses dois tratamentos ($p=0,0505$), pode-se atribuir estes resultados possivelmente a maiores perdas da UP+SA+S por outros processos, como desnitrificação e lixiviação, que tiveram reflexo no menor teor absoluto de N foliar, tendo conseqüentemente impactado a produtividade de grãos.

Outros estudos com a cultura do milho também encontraram correlação entre a produtividade de grãos e a volatilização da amônia. Como, o de Lara Cabezas et al. (1997a) que estimaram uma redução na produtividade de 13,3 kg ha⁻¹ de grãos por kg de N-NH₃ volatilizado, em SPD. Por outro lado, em SPC, houve uma queda de 11,8 kg ha⁻¹ de grãos por kg de N-NH₃ volatilizado. Lara Cabezas et al. (2000) encontraram perdas de 9,9 kg ha⁻¹ de grãos para cada 1% de N-NH₃ volatilizado.

No presente estudo, considerando a média dos fertilizantes testados para cada kg de N-NH₃ perdido por volatilização, ocorreu uma redução de 16,8 kg ha⁻¹ na produtividade de grãos, isto é, a cada 1% de N-NH₃ volatilizado perderam-se em torno de 25 kg ha⁻¹ de grãos.

Somente na ocorrência de importantes perdas por volatilização é possível encontrar correlação inversa entre produtividade e quantidade de perdas, como realizado em estudos precedentes (LARA CABEZAS et al., 1997a,b; 2000).

5.4. Conclusões

Em condição de solo úmido a hidrólise inicia-se no primeiro dia após a aplicação das ureias e a volatilização é mais intensa até o quinto dia, sendo perdidos 92,5% do total de N-NH₃ volatilizado.

Dentre as formulações de ureia pastilhada, a UP+SA proporciona as menores perdas de N-NH₃ por volatilização, não diferindo do SA e da testemunha não adubada com N.

As perdas de N-NH₃ por volatilização entre os fertilizantes avaliados, em ordem crescente são: SA < UP+SA < UP+SA+Zn < UP+SA+S < UP+S < UP < UR.

A adubação nitrogenada influencia a nutrição mineral em N e a produtividade de grãos, sendo os fertilizantes testados equivalentes na sua capacidade de nutrir as plantas em N. As perdas de N por volatilização não afetam os teores de N foliares.

O tratamento UP+SA+S apresenta uma produtividade menor que o SA, sendo que estes não diferem dos demais tratamentos fertilizados.

A nutrição mineral em N correlaciona-se positivamente, e a volatilização, negativamente, com a produtividade de grãos. Estima-se que para cada kg de N-NH₃ perdido por volatilização há uma redução na produtividade de 16,8 kg ha⁻¹ de grãos.

5.5. Referências Bibliográficas

Alves BJR, Santos JCF, Urquiaga S, Boddey RM. Métodos de determinação do nitrogênio em solo e planta. In: Araújo R. S.; Hungria M, editor. Manual de Métodos Empregados em Estudos de Microbiologia Agrícola. Brasília: Embrapa; 1994. p. 449-469.

Araújo ES, Marsola T, Miyazawa M, Soares LHB, Urquiaga S, Boddey RM, Alves BJR. Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. *Pesq Agropec Bras.* 2009; 44:769-776. doi: 10.1590/S0100-204X2009000700018

Belarmino MCJ, Pinto JC, Rocha GP, Ferreira Neto AE, Morais, AR. Altura de perfilho e rendimento de matéria seca de capim-tanzânia em função de diferentes doses de superfosfato

simples e sulfato de amônio. Ciênc Agrotec. 2003; 27:879-885. doi: 10.1590/S1413-70542003000400021

Cantarella H. Nitrogênio. In: Novais RF, Alvarez V, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 375-470.

Cantarella H, Montezano ZF. Nitrogênio e enxofre. In: Prochnow LI, Casarin V, Stipp SR, editores. Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes: nutrientes. Piracicaba: IPNI; 2010. p. 5-46.

Coelho AM. Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho. 23ª ed. Jornal Eletrônico da Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas; 2010.

Contin TLM. Ureia tratada com o inibidor da urease NBPT na adubação de cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo [Dissertação]. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas; 2007.

Costa NR, Andreotti M, Gameiro RA, Pariz CM, Buzetti S, Lopes KSM. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. Pesq Agropec Bras. 2012;1038-1047. doi: 10.1590/S0100-204X2012000800003

Da Ros CO, Aita C, Giacomini SJ. Volatilização de amônia com aplicação de ureia na superfície do solo, no sistema plantio direto. Cienc Rural. 2005; 35:799-805. doi: 10.1590/S0103-84782005000400008

Duarte FM, Pcojeski E, Silva LS, Graupe FA, Britzke D. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia com aplicação de ureia em solo de várzea com diferentes níveis de umidade. Cienc Rural. 2007;37:705-711. doi: 10.1590/S0103-84782007000300016

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; 2009.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Sistema Brasileiro de Classificação do Solo. 3ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2013.

Faria LA. Dinâmica do nitrogênio proveniente de ureia combinada a tecnologias redutoras de volatilização [Tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2013.

Fontoura SMV, Bayer C. Ammonia volatilization in no-till system in the south-central region of the State of Paraná, Brazil. Rev Bras Cienc Solo. 2010;34:1677-1684. doi: 10.1590/S0100-06832010000500020

Galindo FS, Teixeira Filho MCM, Buzetti S, Santini JMK, Alves CJ, Nogueira LM, Ludkiewicz MGZ, Andreotti M, Bellotte JLM. Corn yield and foliar diagnosis affected by nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. Rev Bras Cienc Solo. 2016;40:e0150364. doi: 10.1590/18069657rbc20150364

Gazola D, Zucareli C, Silva RR, Fonseca ICB. Aplicação foliar de aminoácidos e adubação nitrogenada de cobertura na cultura do milho safrinha. Rev Bras Eng Agríc Ambient. 2014;18:700-707. doi: 10.1590/S1415-43662014000700005

Goes RJ, Rodrigues RAF, Takasu AT, Arf O. Características agronômicas e produtividade do milho sob fontes e doses de nitrogênio em cobertura no inverno. *Rev Bras Milho e Sorgo*. 2013;12:250-259. doi: 10.18512/1980-6477/rbms.v12n3p250-259

Lara Cabezas WAR, Korndörfer GH, Motta SA. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema plantio direto e convencional. *Rev Bras Cienc Solo*. 1997a;21:489-496. doi: 10.1590/S0100-06831997000300019

Lara Cabezas WAR, Korndorfer GH, Motta SA. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I- Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. *Rev Bras Cienc Solo*. 1997b;21:481-487. doi: 10.1590/S0100-06831997000300018

Lara Cabezas WAR, Trivelin PCO, Kondörfer GH, Pereira S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). *Rev Bras Cienc Solo*. 2000;24:363-376. doi: 10.1590/S0100-06832000000200014

Lara Cabezas WAR, Couto PA. Imobilização de nitrogênio da ureia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. *Rev Bras Cienc Solo*. 2007;31:739-752. doi: 10.1590/S0100-06832007000400015

Morais TP, Brito CH, Ferreira AS, Luz JMQ. Aspectos morfofisiológicos de plantas de milho e bioquímico do solo em resposta à adubação nitrogenada e à inoculação com *Azospirillum brasilense*. *Rev. Ceres*. 2015;62:589-596. doi: 10.1590/0034-737X201562060012

Mota MR, Sangoi L, Schenatto DE, Giordani W, Boniatti CM, Dall'igna L. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. *Rev Bras Cienc Solo*. 2015;39:512-522. doi: 10.1590/01000683rbc20140308

Nascimento CAC, Vitti GC, Faria LA, Luz PHC, Mendes FL. Ammonia volatilization from coated urea forms. *Rev Bras Cienc Solo*. 2013;37:1057-1063. doi: 10.1590/S0100-06832013000400022

Oliveira JA, Stafanato JB, Goulart RS, Zonta E, Lima E, Mazur N, Pereira CG, Souza HN, Costa FGM. Volatilização de amônia proveniente de ureia compactada com enxofre e bentonita, em ambiente controlado. *Rev Bras Cienc Solo*. 2014;38:1558-1564. doi: 10.1590/S0100-06832014000500021

Prando AM, Zucareli C, Fronza V, Oliveira FÁ, Oliveira Júnior A. Características produtivas do trigo em função de fontes e doses de nitrogênio. *Pesq Agropec Trop*. 2013;43:34-41. doi: 10.1590/S1983-40632013000100009

Queiroz AM, Souza CHE, Machado VJ, Lana RMQ, Korndorfer GH, Silva AA. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea mays* L.). *Rev Bras Milho e Sorgo*. 2011;10:257-266. doi: 10.18512/1980-6477/rbms.v10n3p257-266

Raij BV, Cantarella H. Cereais. In: Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC, editores. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2ª ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas; 1996. (IAC Boletim Técnico, 100).

- Rochette P, Macdonald JD, Angers D, Chantini MH, Gasser M, Bertrand N. Banding urea increased ammonia volatilization in a dry acidic soil. *J Environ Qual*. 2009; 38:1383-1390. doi: 0.2134/jeq2008.0295
- Rojas CAL, Bayer C, Fontoura SMV, Weber MA, Vieiro F. Volatilização de Amônia da Ureia Alterada por Sistemas de Preparo de Solo e Plantas de Cobertura Invernais no Centro-Sul do Paraná. *Rev Bras Cienc Solo*. 2012;36:261-270. doi: 10.1590/S0100-06832012000100027
- Sangoi L, Ernani PR, Lech VA, Rampazzo C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. *Ciênc Rural*. 2003; 33:87-692. doi: 10.1590/S0103-84782003000400016
- Savant NK, James AF, McClellan GH. Effect of amounts and sequence of additions of urea and water on hydrolysis of surface-applied granular urea in unsaturated soils. *Fert Res*. 1987; 11:231-234.
- Schiavinatti AF, Andreotti M, Benett CGS, Pariz CM, Lodo BN, Buzetti S. Influência de fontes e modos de aplicação de nitrogênio nos componentes da produção e produtividade do milho irrigado no cerrado. *Bragantia*. 2011;70:925-930. doi: 10.1590/S0006-87052011000400027
- Silva EC, Buzetti S, Lazarini E. Aspectos econômicos da adubação nitrogenada na cultura do milho em sistema de plantio direto. *Rev Bras Milho e Sorgo*. 2005;4:286-297. doi: 10.18512/1980-6477/rbms.v4n3p286-29
- Silva AG, Porto SMA, Mannigel AR, Muniz AS, Mata JDV, Numoto AY. Manejo da adubação nitrogenada e influencia no crescimento da aveia preta e na produtividade do milho em plantio direto. *Acta Sci Agron*. 2009;31:275-281. doi: 10.1590/S1807-86212009000200014
- Souza TL. Eficiência agronômica de fertilizantes nitrogenados, emissão de CO₂ e volatilização de NH₃ na cultura do milho [Dissertação]. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2015.
- Stafanato JB, Goulart RS, Zonta E, Lima E, Mazur N, Pereira CG, Souza HN. Volatilização de amônia oriunda de ureia pastilhada com micronutrientes em ambiente controlado. *Rev Bras Cienc Solo*. 2013;37:726-732. doi: 10.1590/S0100-06832013000300019
- Tang CY, Kwon Y, Leckie JO. Effect of membrane chemistry and coating layer on physiochemical properties of thin film composite polyamide RO and NF membranes: I. FTIR and XPS characterization of polyamide and coating layer chemistry. *Desalination*. 2009;242:149-167.
- Tasca FA, Ernani PR, Rogeri DA, Gatiboni LC, Cassol PC. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. *Rev Bras Cienc Solo*. 2011;35:493-502. doi: 10.1590/S0100-06832011000200018
- Villas Bôas RL, Boaretto AE, Godoy LJG, Fernandes DM. Recuperação do nitrogênio da mistura de uréia e sulfato de amônio por plantas do milho. *Bragantia*. 2005;64:263-272. doi: 10.1590/S0006-87052005000200014

Vitti GC, Tavares Júnior JE, Luz PHC, Favarin JL, Costa MCG. Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. *Rev Bras Cienc Solo*. 2002;26:663-671. doi: 10.1590/S0100-06832002000300011

Waskom RM, Westfall DG, Spellman DE, Soltanpour PN. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 1996; 27:545-560. doi: 10.1080/00103629609369576

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas áreas de Argissolos das regiões do Médio Sertão e Sul sergipano, verifica-se a necessidade da adubação nitrogenada para o aumento da produtividade do milho. Com o incremento das doses de N ocorre o aumento do rendimento de grãos, quando o fertilizante é aplicado em dose única em cobertura, em sistema de plantio convencional. Nas doses de máxima eficiência recomendadas, o sulfato de amônio proporciona maiores receitas que a ureia perolada.

Os fertilizantes testados apresentaram uma boa capacidade de nutrir as plantas em nitrogênio, uma vez que todos eles resultaram em elevação dos teores de N foliar acima dos níveis críticos estabelecidos na literatura. O mesmo é observado para o S foliar nos tratamentos com formulações adicionadas deste nutriente, independentemente da fonte utilizada.

Em condições de solo úmido, as perdas de nitrogênio por volatilização são mais intensas até o quinto dia após a fertilização. A ureia pastilhada com sulfato de amônio e o sulfato de amônio são os fertilizantes que apresentam as menores perdas por volatilização.

As perdas por volatilização de $N-NH_3$ são inversamente proporcionais à produtividade de grãos de milho no Argissolo Vermelho-Amarelo, em Nossa Senhora das Dores, e no Argissolo Acinzentado, em Umbaúba.