

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**NITROGÊNIO NÍTRICO E AMONÍACAL NO DESENVOLVIMENTO  
DA PARTE AÉREA DE MILHO CULTIVADO EM ARGISSOLO**

João Eduardo Simões Maças  
(Dissertação)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**NITROGÊNIO NÍTRICO E AMONIACAL NO DESENVOLVIMENTO  
DA PARTE AÉREA DE MILHO CULTIVADO EM ARGISSOLO**

**JOÃO EDUARDO SIMÕES MAÇÃS**  
Engenheiro-Agrônomo (ESALQ/USP)

Dissertação apresentada como  
um dos requisitos para obtenção  
do grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Setembro de 2008.

A minha esposa, Márcia Aparecida Bethiol Maçãs, pela sua existência e pelo incentivo. A meus pais Eduardo Simões Maçãs e Tomita Kioco Maçãs, não mais entre nós, mas ajudando-me, onde estiverem nas horas mais difíceis e a meu filho Rafael pela sua existência e pela torcida.  
DEDICO.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade para realização do curso.

Ao Prof. Egon José Meurer, pela amizade, orientação, confiança e apoio em mim depositados durante a realização deste trabalho.

Aos professores da Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos conhecimentos, e especialmente ao Prof. Carlos Bissani, o qual me auxiliou no início e final da concretização deste sonho de vida e profissional.

Aos executivos da Yara Brasil, pela oportunidade concedida, compreensão e apoio durante esta jornada, em especial Carlos Lubus, Lair Hanzen, Marco Antonio Raymundo, Paulo Yvan Schaulcher de Almeida e Pedro Alvise Ceratti Manfro.

Aos pesquisadores José Antonio Quaggio, Heitor Cantarella e Bernardo Van Raij, pela confiança e referência para meu ingresso nesta jornada.

Ao pesquisador Leo Nobre de Miranda, da Embrapa Cerrados, e Jackson Ernani Fiorin da Fundacep pela amizade e imensa ajuda no delineamento e análises estatísticas.

Ao amigo Nelson Horowitz, que, sem ele, nada disso seria possível.

Aos colegas do PPG – Ciência do Solo, pelo agradável convívio durante o curso.

Aos funcionários do Departamento de Solos Jader Ribeiro Amaro, Paulo Ricardo Teixeira da Luz, e especialmente ao José Ferreira da Silva, pela ajuda na condução dos trabalhos na casa-de-vegetação, e ao Adão Luis Ramos dos Santos, pelo apoio laboratorial.

A todos que sempre torceram e acreditaram em mim, mesmo distantes.

Muito obrigado!

# NITROGÊNIO NÍTRICO E AMONIACAL NO DESENVOLVIMENTO DA PARTE AÉREA DE MILHO CULTIVADO EM ARGISSOLO <sup>(1)</sup>

Autor: João Eduardo Simões Maçãs  
Orientador: Prof. Dr. Egon José Meurer

## RESUMO

O nitrogênio é um dos nutrientes que mais limita o desenvolvimento e produtividade da maioria das culturas. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de fontes de nitrogênio, com e sem um inibidor de nitrificação (nitrapirina), sobre o desenvolvimento da parte aérea e absorção de nutrientes por plantas de milho cultivadas em vasos por 30 dias, em amostra de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. O estudo foi realizado com 10 tratamentos e três repetições, variando-se a forma do nitrogênio aplicado ao solo (Testemunha, 100% N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 100% N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 50% N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e 100% N-amídico) com e sem o inibidor da nitrificação. A aplicação de nitrapirina ao solo não afetou o rendimento de matéria seca do milho e nem a absorção de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, reduzindo, porém, a absorção do NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. O maior rendimento de matéria seca ocorreu com o suprimento do nitrogênio na forma de nitrato de amônio (50% NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). A absorção de fósforo, potássio, enxofre, cálcio, cobre e zinco não foram afetadas pela aplicação do inibidor ao solo. A absorção de magnésio e de manganês foi reduzida na presença da nitrapirina.

---

<sup>1</sup> Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (59p.) Setembro, 2008.

# NITRIC AND AMMONIUM NITROGEN IN THE DEVELOPMENT OF THE AERIAL PART OF CORN IN HAPLUDULT SOIL<sup>(1)</sup>

Author: João Eduardo Simões Maças

Adviser: Egon José Meurer

## ABSTRACT

Nitrogen is one of the nutrients that most limits the development and productivity of most crops. The objective of this study was to evaluate the effect of nitrogen sources with and without a nitrification inhibitor (nitrapyrin) on the development of the aerial part and absorption of nutrients by corn plants grown in vases for 30 days in a Hapludult soil sample. The study was done with 10 treatments and three repetitions, varying the form of the nitrogen applied to the soil (control without N, 100% N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 100% N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 50% N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and 100% N-amidic) with and without the nitrification inhibitor. The application of nitrapyrin to the soil did not affect the yield of the corn's dry matter and neither the absorption of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, reducing, however, the absorption of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. The greater yield of dry matter took place with the supply of nitrogen in the form of ammonium nitrate (50% NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). The absorption of phosphorus, potassium, sulphur, calcium, copper, and zinc were not affected by the application of the inhibitor to the soil. The absorption of magnesium and manganese was reduced in the presence of nitrapyrin.

---

<sup>1</sup> M.Sc. Dissertation in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (59p.) - September, 2008.

## SUMÁRIO

|   | Página |
|---|--------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>   | 01     |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | 03     |
| 2.1 O nutriente nitrogênio (N).....   | 03     |
| 2.2 O ciclo do nitrogênio.....  | 04     |
| 2.2.1 Dinâmica do nitrogênio no solo .....  | 05     |
| 2.3 Fontes de nitrogênio.....   | 08     |
| 2.4 Fertilizantes nitrogenados estabilizados com nitrapirina ....   | 09     |
| 2.5 A absorção de nitrogênio pelas plantas.....   | 10     |
| 2.6 Nitrogênio nítrico (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) versus amoniacal (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) e o rendimento das culturas ..... | 12     |
| 2.7 Interação do nitrogênio com outros nutrientes .....   | 15     |
| 2.8 Toxidez de amônio em plantas .....  | 18     |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>  | 23     |
| 3.1 Preparo do solo .....   | 25     |
| 3.1.1 Aplicação da adubação básica, do nitrogênio e nitrapirina no solo .....   | 25     |
| 3.1.2 Condução do experimento em casa-de-vegetação .....  | 27     |
| 3.1.3 Análise estatística.....  | 28     |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>   | 29     |
| 4.1 Produção de matéria seca na parte aérea .....   | 29     |
| 4.2 Nitrogênio total acumulado na parte aérea.....  | 32     |
| 4.3 N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> e N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> acumulados na parte aérea .....                                       | 34     |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.4       | Potássio, cálcio e magnésio acumulados na parte aérea | 35        |
| 4.5       | Fósforo e enxofre acumulados na parte aérea.....      | 38        |
| 4.6       | Cobre, manganês e zinco acumulados na parte aérea ... | 40        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                | <b>44</b> |
| <b>6.</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>               | <b>45</b> |
| <b>7.</b> | <b>APÊNDICES .....</b>                                | <b>52</b> |



## LISTA DE TABELAS

|   | Página |
|---|--------|
| 1 Fertilizantes nitrogenados solúveis mais comuns .....   | 08     |
| 2 Alguns atributos da amostra superficial (20 cm de profundidade) de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (Embrapa, 1999), coletado no município de Viamão, RS, pertencente a unidade de mapeamento Itapoã, antes da correção com carbonato de cálcio ..... | 24     |
| 3 Tratamentos com as fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) utilizadas no cultivo de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação.....   | 27     |
| 4 Matéria seca acumulada da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....                            | 30     |
| 5 Nitrogênio total acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....                         | 33     |
| 6 $\text{N-NO}_3^-$ e $\text{N-NH}_4^+$ acumulados na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....  | 35     |
| 7 Potássio acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....                                 | 36     |
| 8 Cálcio acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....                                   | 37     |
| 9 Magnésio acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....                                 | 38     |

|  |    |
|--|----|
| 10 Fósforo acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....  | 39 |
| 11 Enxofre acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....  | 40 |
| 12 Cobre acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....    | 41 |
| 13 Manganês acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)..... | 42 |
| 14 Zinco acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....    | 43 |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| 1 Ciclo do nitrogênio com o estado de oxidação do N, escala de potencial redox e fluxo energético no solo .....  | 03     |
| 2 Ciclo do nitrogênio.....   | 05     |
| 3 Absorção de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) através da membrana plasmática .....  | 10     |
| 4 Toxicidade do $\text{NH}_4^+$ .....  | 20     |
| 5 Vista das unidades experimentais com as plantas de milho após o desbaste em casa-de-vegetação, e individualmente com detalhes do sistema de fechamento do fundo. ....  | 26     |
| 6 Plantas de milho cultivadas em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de nitrogênio sem inibidor de nitrificação (nitrapirina), com detalhe para a deficiência de N no tratamento testemunha (T1) .....        | 31     |
| 7 Plantas de milho cultivadas em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de nitrogênio sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina), indicando o efeito não tóxico da nitrapirina em relação às plantas. .... | 32     |

## LISTA DE APÊNDICES

|   | Página |
|---|--------|
| 1 Matéria seca acumulada ( $\text{g vaso}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).....          | 53     |
| 2 Concentração de N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação nitrapirina) .....                 | 53     |
| 3 Concentração de $\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação nitrapirina) .....  | 54     |
| 4 Concentração de $\text{NH}_4^+$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) ..... | 54     |
| 5 Concentração de P ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....                | 55     |
| 6 Concentração de K ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....                | 55     |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 7  | Concentração de Ca ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....   | 56 |
| 8  | Concentração de Mg ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....   | 56 |
| 9  | Concentração de S ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....  | 57 |
| 10 | Concentração de Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....  | 57 |
| 11 | Concentração de Mn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....  | 58 |
| 12 | Concentração de Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) .....  | 58 |
| 13 | Valores de F Tratamento (F Trat.) e coeficiente de variação (CV) da análise de variância dos resultados de matéria seca da parte aérea e teores de nutrientes em tecido de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina ..... | 59 |

## 1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio é um dos nutrientes que mais limita o desenvolvimento, a produtividade e a biomassa da maioria das culturas. Na agricultura, as principais fontes de nitrogênio são os fertilizantes derivados da amônia anidra, como a uréia, o sulfato de amônio e o nitrato de amônio. Estes fertilizantes apresentam diferentes formas de nitrogênio: amídica, nítrica e amoniacal. Considera-se ainda a ação de microrganismos aeróbios no solo, participando no processo de nitrificação, transformando o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).

Inúmeros trabalhos indicam a existência de diferenças no desenvolvimento de gramíneas (milho, trigo e outros cereais) na presença diferentes formas de nitrogênio aplicadas ao solo. Além disto, formas nítricas lixiviam com maior facilidade do que as amoniacais, resultando em problemas ambientais, como a contaminação de lençóis freáticos e de mananciais de água, o que pode possibilitar a entrada deste elemento na cadeia alimentar.

A utilização de fertilizantes nitrogenados com as duas formas de nitrogênio (nítrica -  $\text{NO}_3^-$  e amoniacal -  $\text{NH}_4^+$ ), e de inibidores de nitrificação, os quais podem manter o nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo por períodos mais prolongados, correspondem a alternativas tecnológicas disponíveis na atualidade. Estas podem incrementar a produtividade e reduzir os problemas ambientais causados pela lixiviação do nitrogênio nítrico, devido à possibilidade de melhoria no desenvolvimento radicular. Além disso, a disponibilidade de nitrogênio nítrico e amoniacal pode em efeitos sinérgicos ou antagônicos na absorção de outros nutrientes, como o fósforo, potássio, cálcio e magnésio, e desta forma, interferindo na nutrição da planta.

Existem compostos comprovadamente eficientes para retardar a nitrificação. Dentre eles, destacam-se a nitrapirina, a dicianodiamida (DCD) e, mais recentemente, o fosfato de 3,4-dimetilpirazole (DMPP). O 3-metilpirazole (3MP) é também utilizado, juntamente com o DCD, comercialmente em algumas formulações.

No mercado brasileiro, atualmente, existem fertilizantes nitrogenados contendo inibidores de nitrificação. Embora haja disponibilidade de investigações sobre o uso destes inibidores no exterior, poucos estudos em relação a este assunto foram realizados no Brasil. Principalmente com fertilizantes nitrogenados contendo as formas de nitrogênio nítrico e amoniacal.

O tema deste estudo foi avaliar o desenvolvimento parte aérea e absorção de nutrientes em milho cultivado em um argissolo, na presença de nitrogênio nítrico, amoniacal e amídico, com e sem inibidor de nitrificação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O nutriente nitrogênio (N)

O nitrogênio é um dos nutrientes exigidos em maior quantidade pelas culturas, e este fato, associado à crescente demanda da humanidade por alimentos, energia e fibras, requer o aumento da produtividade das lavouras, e, conseqüentemente, o seu consumo também tende a aumentar.

Este nutriente é afetado por uma dinâmica complexa e seu manejo, objetivando o aumento do aproveitamento pelas plantas, é considerado um dos mais difíceis. Além disso, o nitrogênio apresenta grande versatilidade nas reações de oxirredução, e está presente em vários estados de oxidação, o que lhe confere especial importância nos ciclos biogeoquímicos e no metabolismo das plantas (Epstein e Bloom, 2005).

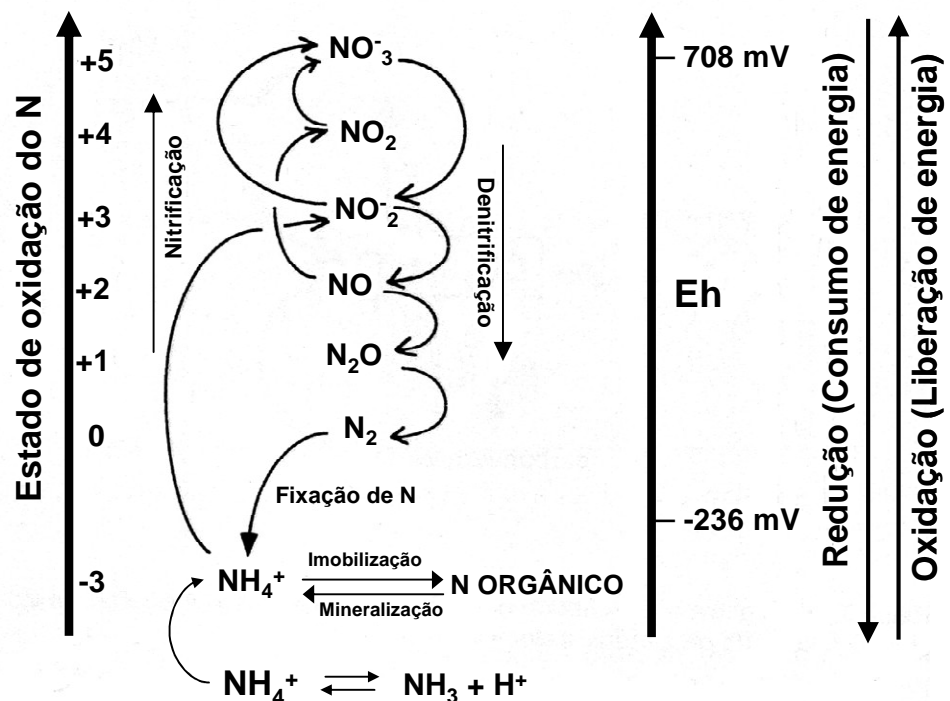


Figura 1. Ciclo do nitrogênio com o estado de oxidação do N, escala de potencial redox e fluxo energético no solo – Adaptado de McBride (1994).



Cerca de um quarto do gasto energético pelas plantas está relacionado com as diversas reações envolvidas na redução do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), e subsequente incorporação do nitrogênio às formas orgânicas nas plantas (Epstein e Bloom, 2005). Tisdale et al. (2005) citam que a redução do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é um processo que requer energia, o qual utiliza duas moléculas de nitrato redutase (NADH) para cada nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) reduzido na síntese de proteínas. Desta forma, o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é a forma de nitrogênio (N) pelas plantas, devido ao menor gasto energético em relação ao nitrato, ou seja, um passo a menos no processo de redução no interior das células.

## 2.2 O ciclo do nitrogênio

As reações com o nitrogênio (N) orgânico no solo são predominantemente mediadas por microrganismos e, desta forma, sujeitas às condições de solo e clima (Figura 2). O nitrogênio nos resíduos vegetais (restos vegetais) e animais (esterco) e o nitrogênio derivado da atmosfera através dos processos elétrico, combustão, microbiológicas e industrial (processos nos quais o nitrogênio molecular,  $\text{N}_2$ , é combinado com  $\text{H}_2$  ou  $\text{O}_2$ ) é adicionado ao solo. O nitrogênio nos resíduos é mobilizado como  $\text{NH}_4^+$  pelos organismos do solo como um produto final de decomposição. As raízes das plantas absorvem parte do  $\text{NH}_4^+$ . Parte do  $\text{NH}_4^+$  é convertido para  $\text{NO}_3^-$  por bactérias nitrificadoras em um processo chamado de nitrificação. O  $\text{NO}_3^-$  é absorvido pelas raízes das plantas e (juntamente com o  $\text{NH}_4^+$  absorvido) é utilizado para produzir proteínas em culturas que alimentam as pessoas e os animais domésticos. As plantas podem perder  $\text{N}_2\text{O}$  para a atmosfera, além de também liberar N na forma de amônia ( $\text{NH}_3$ ), porém as plantas também podem absorver amônia ( $\text{NH}_3$ ) da atmosfera. Parte do  $\text{NO}_3^-$  é perdido para as águas subterrâneas ou sistemas de drenagem, como resultado do movimento descendente da água de percolação. Outra parte do  $\text{NO}_3^-$  é convertido por bactérias desnitrificadoras para  $\text{N}_2$  e óxidos de nitrogênio ( $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NO}$ ) que escapam para a atmosfera, completando o ciclo.

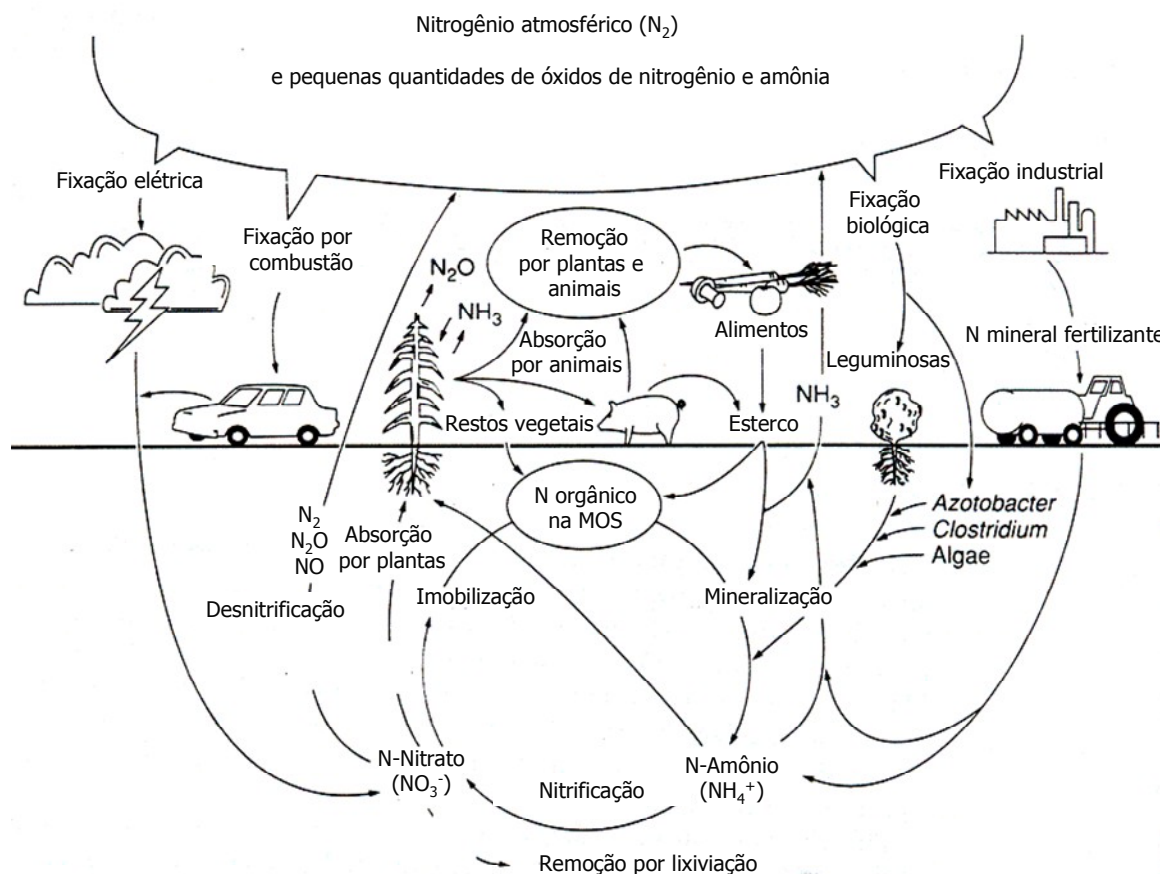


Figura 2. Ciclo do nitrogênio – Adaptado de Tisdale et al. (1993).

### 2.2.1 Dinâmica do nitrogênio no solo

Considerando-se a complexidade do ciclo do nitrogênio, e, principalmente, o objetivo do presente trabalho, a revisão foi realizada com foco no processo de nitrificação.

A nitrificação, ou oxidação do nitrogênio amoniacal ( $NH_4^+$ ) para nitrato ( $NO_3^-$ ), é realizada no solo por bactérias quimioautotróficas, que obtêm energia no processo e que podem sintetizar a biomassa microbiana a partir do  $CO_2$ . havendo carbono (C) disponível, o nitrogênio na forma amoniacal ( $NH_4^+$ ) no solo é rapidamente assimilado por microrganismos à biomassa microbiana,. Porém, em solos, a limitação de carbono e de energia são mais comuns e, com estas condições, o amônio ( $NH_4^+$ ) é consumido pelos microrganismos nitrificadores e rapidamente oxidado para nitrito ( $NO_2^-$ ) e, em seguida para nitrato ( $NO_3^-$ ), ocorrendo a predominância de N nesta forma nos solos em condições aeróbias (Cantarella, 2007).

Tisdale et al. (2005) citam que, em solos úmidos com temperaturas amenas e disponibilidade adequada de oxigênio, a quantidade de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) na solução do solo é geralmente maior do que a de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ).

Em relação ao tempo, solos em condições aeróbias e altas temperaturas, oxidam o N amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) para nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) em poucos dias (15 a 30 dias). Assim sendo, solos adubados com N amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) estarão em curto prazo com aporte de nitrogênio predominantemente na forma de nitrato (Cantarella, 2007). Sousa e Lobato (2002), citam que, o nitrogênio na forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), depois de aplicado ao solo, é convertido para a forma nítrica ( $\text{NO}_3^-$ ) em um pequeno intervalo de tempo (em torno de três semanas).

Os estudos conduzidos para avaliar a absorção de nitrogênio nas formas de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ou mistura de ambas as formas, praticamente em sua totalidade, foram realizados em cultivos hidropônicos na ausência de microrganismos nitrificadores, os quais estão presentes nos solos.

Como a nitrificação é mediada pela microbiota do solo, as alterações que ocorrem no meio afetam as populações microbianas e o seu desenvolvimento, e são definidas como fatores de natureza biótica e abiótica que atuam seletivamente na microbiota do solo. Deste modo, existem fatores abióticos ou ambientais que limitam o crescimento e selecionam os organismos do solo. As limitações abióticas ao crescimento e à permanência de microrganismos em um determinado ecossistema, como o solo, são regidas pela “lei do mínimo” de Liebig e pela “lei de tolerância” de Shelford e, assim sendo, de forma geral, pode-se dizer que a presença de um organismo ou grupo em um determinado ecossistema depende das duas leis, ou seja, os níveis populacionais da maioria dos organismos são controlados pela quantidade e pela diversidade de materiais, que possuem um requerimento mínimo, pelos fatores físicos críticos e pela capacidade de tolerância destes microrganismos e de outros componentes do ambiente (Atlas e Bartha, 1993).

Complementando os relatos sobre o assunto, Moreira e Siqueira (2002) citam que, a nitrificação é realizada por diferentes grupos de bactérias quimioautotróficas. São bactérias Gram negativas da família Nitrobacteriaceae, capazes de crescer às custas da energia no amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ou nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) existentes nos solos. Esta oxidação do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ocorre em duas etapas.

A primeira etapa é a nitrificação com transformação do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) para nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), mediada, por exemplo, por bactérias do gênero *Nitrosomonas*. A segunda etapa é a nitratação, que é a transformação do nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) para nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), realizada por bactérias do gênero *Nitrobacter*. Além do gênero *Nitrosomonas*, bactérias dos gêneros *Bacillus*, *Corynebacterium* e *Achromobacter* também são capazes de realizar a nitrificação em solos. Além da diversidade biológica destes organismos edáficos, ainda existe alta diversidade metabólica e fisiológica, resultando em extrema versatilidade para a ocupação dos diversos nichos ecológicos.

Pelo ponto de vista da química do solo, segundo MacBride (1994), o processo de nitrificação gera acidificação, conforme a seguinte reação:



Esta reação pode não resultar em acidificação ao menos que o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) resultante da nitrificação seja perdido por lixiviação juntamente com cátions básicos, deixando que os íons hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) formados, ocupem os sítios de troca. Outro destino do nitrato formado pela nitrificação no solo é a absorção pelas plantas gerando alcalinidade, cujo o resultado final pode não ser a acidificação, conforme a equação abaixo:

(Absorção de ânions) – (absorção de cátions) = íons  $\text{OH}^-$  ou  $\text{HCO}_3^-$  excretados

Por outro lado, Meurer (2006) cita que os fertilizantes que são adicionados ao solo pelo homem podem ocasionar redução do pH do solo. É o caso, por exemplo, de fertilizantes com nitrogênio, como o sulfato de amônio  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ , quando utilizados frequentemente em solos, principalmente com baixo poder tampão. A absorção de cátions (por exemplo,  $\text{NH}_4^+$ ) pela planta, resulta em excreção de íons hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) pelas raízes das plantas, para manter a eletroneutralidade, conforme a equação abaixo citada por MacBride (1994):

(Absorção de cátions) – (absorção de ânions) = íons  $\text{H}^+$  excretados

### 2.3 Fontes de nitrogênio

A maioria dos fertilizantes nitrogenados utilizados na agricultura são solúveis em água e o N é prontamente disponível para as plantas (Tabela 1).

Tabela 1. Fertilizantes nitrogenados solúveis mais comuns

| Fertilizante        | Forma do N          | Teor de nutriente |                               |                  |    |
|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|----|
|                     |                     | N                 | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | S  |
|                     |                     | ----- % -----     |                               |                  |    |
| Uréia               | Amídica             | 45-46             |                               |                  |    |
| Nitrato de amônio   | Amoniacal e nítrica | 33                |                               |                  |    |
| Sulfato de amônio   | Amoniacal           | 21                |                               |                  | 23 |
| Nitrocálcio         | Amoniacal e nítrica | 21 a 28           |                               |                  |    |
| DAP                 | Amoniacal           | 16-18             | 42-48                         |                  |    |
| MAP                 | Amoniacal           | 11                | 52                            |                  |    |
| Amônia anidra       | Amoniacal           | 82                |                               |                  |    |
| Uran                | Amídica (~50%)      | 28-32             |                               |                  |    |
|                     | Amoniacal (~25%)    |                   |                               |                  |    |
|                     | nítrica (~25%)      |                   |                               |                  |    |
| Nitrato de sódio    | Nítrica             | 16                |                               |                  |    |
| Nitrato de cálcio   | Nítrica             | 15-16             |                               |                  |    |
| Nitrato de potássio | Nítrica             | 13                |                               | 46               |    |
| Nitrosulfato        | Amoniacal e nítrica | 26                |                               |                  | 15 |
| Nitrofosfatos       | Amoniacal e nítrica | 13-26             | 6-34                          |                  |    |

Fonte: IFDC (1979); Rajj et al. (1997)

Desta forma, a eficiência dos fertilizantes tende a ser semelhante. Porém, diferenças podem ocorrer devido a mecanismos de perdas, presença ou interação com outros nutrientes, ou condições de baixo pH do solo.

## 2.4 Fertilizantes nitrogenados estabilizados com nitrapirina

Segundo Siqueira e Moreira (2002), as bactérias, de modo geral, representam o grupo mais numeroso da biota do solo ( $10^{14}$  organismos por metro quadrado de solo em 50 gramas de biomassa).

Por esta razão, em experimentos com o objetivo de avaliar a absorção de nitrogênio amoniacal em solos não esterilizados, a presença destas bactérias é praticamente inevitável. Por esta razão, o uso de inibidores de nitrificação corresponde a uma opção técnica disponível para manter o nitrogênio na forma amoniacal no solo.

A nitrapirina, quimicamente denominada 2-cloro-6-(triclorometil) piridina, apresenta efeito altamente seletivo sobre as *Nitrosomonas*, e além de reduzir e inibir a atividade desta bactéria, extermina parte da população de *Nitrosomonas* no solo, resultando em um efeito bactericida (Trenkel, 1997).

Este inibidor de nitrificação é comercializado há mais tempo nos EUA. É recomendado para uso em mistura com fertilizantes nitrogenados amoniacais, tais como: amônia anidra, sulfato de amônio, uran, nitrato de amônio e esterco animais (Cantarella, 2007).

Dados obtidos em Kentucky mostraram que a nitrapirina foi eficiente também quando adicionada à uréia ou ao nitrato de amônio e aplicada na superfície em milho em plantio direto (Frye, 2005). No entanto, o fabricante recomenda a incorporação do produto ao solo. A nitrapirina é um produto com alta pressão de vapor e, apresenta tendência à volatilização. Por esta razão, a recomendação indica a incorporação deste inibidor ao solo com o fertilizante (como aditivo), em faixas ou sulcos a 5-10 cm de profundidade.

A decomposição da nitrapirina ocorre em até 30 dias ou menos em solos com temperatura ideal para o crescimento e desenvolvimento de plantas. O efeito inibidor da nitrapirina geralmente é eficaz por seis a oito semanas. Em épocas mais frias ou solos congelados, o inibidor é mais persistente. Por esta razão, a nitrapirina é indicada em climas temperados, para uso no outono, antes do congelamento do solo, objetivando o aporte de nitrogênio estabilizado para a cultura do verão seguinte.

Nessas condições, o período de inibição pode se manter por até 30 semanas (Trenkel, 1997). Anghinoni e Barber (1990), conduzindo experimento na Universidade de Purdue nos EUA, com milho em solo, utilizaram a nitrapirina na dose de  $8 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo, objetivando retardar a nitrificação por 14 a 40 dias. Crawford e Chalk, conduzindo experimento na Universidade de Melbourne na Austrália, com trigo cultivado em solo, também utilizaram a nitrapirina, porém na dose de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo com controle da nitrificação por 25 dias. Oliveira et al. (2007), conduzindo experimento em casa-de-vegetação na Universidade Federal de Uberlândia com arroz em solo, utilizaram a nitrapirina, também na dose  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo, com o objetivo de controlar a nitrificação por um período de 16 dias.

## 2.5 A absorção de nitrogênio pelas plantas

O nitrogênio está presente no solo na forma de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), aminoácidos, peptídios e formas complexas insolúveis. Os vegetais diferem em sua preferência pelas fontes de nitrogênio, mas absorvem este nutriente principalmente nas formas inorgânicas, como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ou amônio (Williams e Miller, 2001).

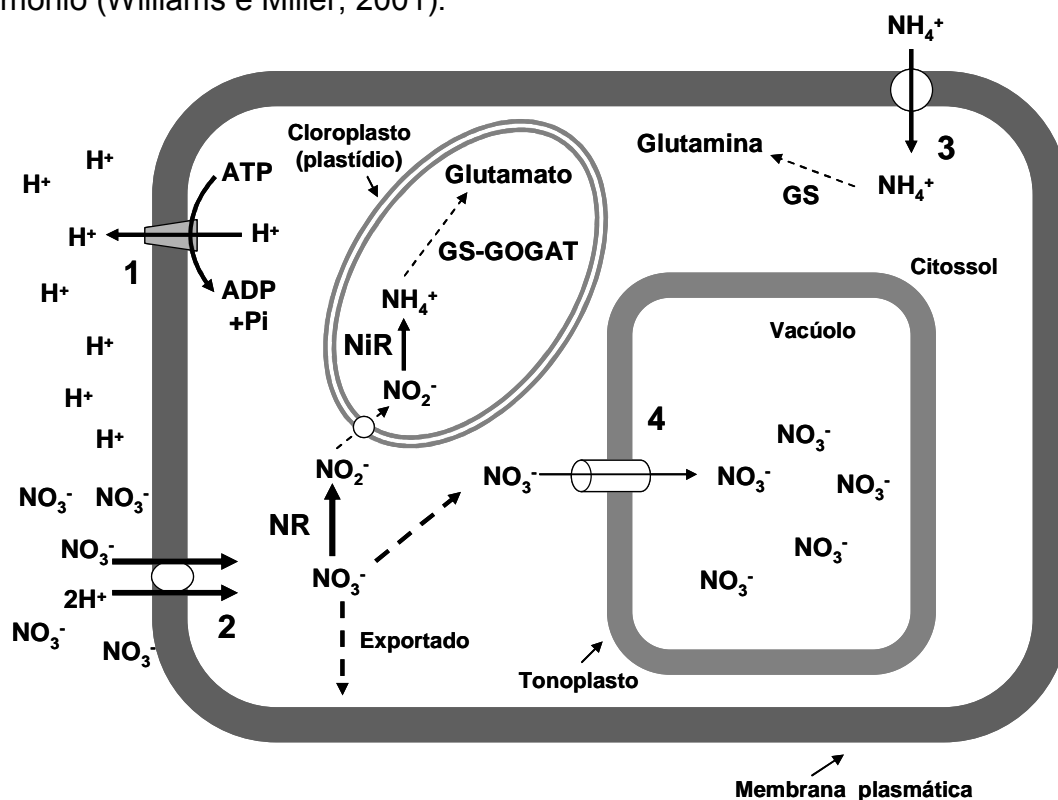


Figura 3. Absorção de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) através da membrana plasmática. (1) Bomba de prótons (P- $\text{H}^+$ ATPase); (2) transportador de  $\text{NO}_3^-$  (simporte); (3) transportador de  $\text{NH}_4^+$  (uniporte).

O nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) são absorvidos pelas plantas por processos dependentes de energia. Uma bomba de prótons existente na plasmalema (P- $\text{H}^+$ ATPase), hidrolisa ATP, bombeando íons  $\text{H}^+$  para o exterior da célula, e resulta em um gradiente de potencial eletroquímico. O gradiente de prótons produz uma força próton motriz, direcionando os íons hidrogênio do exterior da célula para o citossol.

O gradiente de potencial eletroquímico permite a entrada de cátions no interior da célula. Os ânions são absorvidos acompanhando o fluxo de prótons. Assim sendo, a absorção do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é passiva e ocorre por meio de um transportador tipo uniporte, enquanto a absorção do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é um processo ativo secundário, em simporte com 2 íons hidrogênio (Figura 3) (Souza e Fernandes, 2006).

A absorção de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) pelas raízes das plantas é rapidamente inibida pela exposição ao amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). A rapidez deste efeito conduz à suposição de que a inibição resulta do efeito direto do amônio na membrana plasmática. Este mecanismo de inibição, entretanto, tem sido objeto de controvérsia (Kronzucker et al., 1999).

Através da ação seqüencial das enzimas nitrato redutase e nitrito redutase, o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) absorvido pode ser reduzido a amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). O nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) pode ser também retido no vacúolo ou exportado para diversas regiões da planta. O transporte do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para as folhas ocorre pelo xilema, porém a redistribuição a partir das folhas para outros órgãos ocorre predominantemente na forma de aminoácidos, através do floema. Essa redistribuição é essencial para suprir os tecidos que não estão incluídos na assimilação de nitrogênio (Souza e Fernandes, 2006).

O amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) absorvido pelas plantas ou oriundo da redução do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é incorporado em esqueletos de carbono, preferencialmente por meio das enzimas da via glutamina sintetase glutamato sintase (GS-GOGAT). A redução do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e a assimilação do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) são processos dependentes de energia, como ATP, e de poder redutor, como o NADH, o NADPH e a ferredoxina reduzida, além de esqueletos de carbono derivados do ciclo de Krebs, como o  $\alpha$ -cetogluturato. Esses processos drenam esqueletos de carbono, energia e doadores de elétrons, competindo com o metabolismo do carbono (Souza e Fernandes, 2006).



Ocorrendo a assimilação do nitrogênio nas raízes, os aminoácidos sintetizados são transportados para as folhas via fluxo transpiratório pelo xilema (Marschner et al., 1995).

Embora a taxa relativa de absorção de cada forma de nitrogênio possa não ter relação com a quantidade disponível de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ou nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), a assimilação de amônio requer menos energia do que para o nitrato (von Wieren, 2000).

Neste aspecto, Tisdale et al. (2005) citam que o amônio é a forma preferencial devido à conservação de energia na assimilação do nitrogênio absorvido em relação ao nitrato (um passo a menos no processo de redução do N).

## **2.6 Nitrogênio nítrico ( $\text{NO}_3^-$ ) versus amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) e o rendimento das culturas**

Existem evidências crescentes de que a nutrição parcial de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) melhora o desenvolvimento do arroz (*Oryza sativa*), embora a planta manifeste preferência pelo amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ao invés do nitrato (Duan et al., 2007). Recentemente, pesquisadores têm mostrado mais e mais atenção à nutrição parcial de nitrato no cultivo de arroz, e os resultados de pesquisas indicaram que o arroz inundado foi excepcionalmente eficiente em absorver o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) formado pela nitrificação na rizosfera (Kirk e Kronzucker, 2005; Duan et al., 2006). Kirk e Kronzucker (2005) e Kronzucker et al. (1999, 2000) concluíram que a absorção de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) pelo arroz inundado poderia ser mais importante do que já é reconhecida; a absorção de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) poderia ser comparável ao amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e poderia resultar em um terço do total do nitrogênio absorvido pelas plantas de arroz. Por esta razão, embora a forma predominante de N mineral em solos inundados de arroz seja provavelmente o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), as raízes são na verdade expostas a um suprimento misto de nitrogênio na rizosfera (Briones et al., 2003; Li et al., 2006). O crescimento e a assimilação de nitrogênio do arroz foram significativamente melhorados com a adição de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) na solução nutritiva com amônio como única fonte de nitrogênio (Duan et al., 2006). O aumento na assimilação de nitrogênio poderia ser atribuído ao aumento do influxo de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) causado pelo nitrato (Kronzucker et al., 1999)

Pesquisadores constataram que o aporte de nitrogênio para as plantas nas formas de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ao mesmo tempo, em comparação com o fornecimento isolado de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), pode resultar em incrementos de rendimento em várias culturas (Smiciklas e Below, 1992; Wiesler, 1998). Smiciklas e Below (1992) com alguns híbridos de milho em condições de campo, constataram incrementos de 6 a 10% com a utilização de fertilizantes com nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) estabilizado com inibidor de nitrificação.

Todos os experimentos resultaram em aumento do número de grãos por planta, resultante da menor taxa de aborto dos grãos da extremidade da espiga (Below, 2000).

Wiesler (1998), revisando diversos textos publicados sobre o tema, observou que o efeito da nutrição mista com nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é mais facilmente observado em experimentos realizados em sistemas hidropônicos. No entanto, experimentos conduzidos a campo resultaram em dados variáveis, inclusive ocorrendo situações com decréscimos moderados no rendimento de grãos. A dificuldade na manutenção do nitrogênio na forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo por longos períodos, devido ao rápido processo de nitrificação, mesmo com o uso de inibidores de nitrificação, é uma das razões para a variabilidade dos resultados experimentais (Wiesler, 1998).

Thomas e Sodek (2005), em um estudo para comparar o desenvolvimento de soja nodulada em cultivo com prolongado alagamento na presença de fontes inorgânicas de nitrogênio (nitrato, amônio e ambas as formas), constataram o efeito benéfico do nitrato na produção de matéria seca.

Chen et al. (2005) realizaram experimentos com três cultivares de couve chinesa (*Brassica chinensis* L.) em solução hidropônica com três relações amônio: nitrato (0:100, 25:75 e 50:50). A relação ótima para o máximo crescimento de couve chinesa, além do menor teor de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) na biomassa, foi encontrado na proporção amônio:nitrato de 25:75.

Ali et al. (2001) conduziram experimento em sistema hidropônico com cevada (*Hordeum vulgare* L.). O nitrogênio na dose de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  foi fornecido em cinco proporções na forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) e nítrica ( $\text{NO}_3^-$ ): 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 e 100/0. Os suprimentos de nitrogênio nas formas amoniacal e nítrica resultaram em maiores acúmulos de nitrogênio e significativos aumentos da produção de matéria seca pelas plantas, em relação aos suprimentos isolados de nitrogênio na forma amoniacal ou nítrica.

Andrade et al. (2001) observaram os efeitos de diferentes proporções de nitrogênio nítrico ( $\text{NO}_3^-$ ) e amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ): 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 e 100/0, em plantas de *Panicum maximum*, cv. Vencedor, com 25 dias após a germinação, cultivadas em câmara de crescimento e com solução nutritiva.

As diferentes proporções de nitrogênio nítrico ( $\text{NO}_3^-$ ) e amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) foram aplicadas na dose de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  de nitrogênio durante 4 dias, e as plantas que receberam nitrato, combinados ou não com amônio, apresentaram o peso de matéria seca de raízes e da parte aérea superiores às que receberam somente amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) como fonte de nitrogênio.

Tisdale et al. (2005) citam que o crescimento vegetal é melhorado quando as plantas são nutridas com nitrato e amônio, comparado com o suprimento apenas de nitrato ou amônio.

Fancelli e Tsumanuma (2007) citam que a disponibilidade adequada de nitrogênio no início da vida das plantas (incluindo leguminosas), associada ao equilíbrio entre as formas amoniacal e nítrica, constituem-se em requisitos fundamentais para o crescimento e funcionamento do sistema radicular.

Por outro lado, as informações científicas avaliadas pelo ponto de vista prático não indicam vantagem no uso de fertilizantes nitrogenados nítrico-amoniacais (Cantarella, 2007).

## 2.7 Interação do nitrogênio com outros nutrientes

A aquisição de nutrientes pelas plantas no solo ocorre através do crescimento das raízes e por suas ramificações. A quantidade de nutrientes absorvida é determinada pela área superficial total de raízes e pela taxa de absorção por unidade de superfície de raiz. A taxa de absorção depende da cinética de absorção e da capacidade de suprimento de nutrientes pelo solo até a superfície da raiz. Desta forma, o significado da eficiência passa pelo entendimento da fisiologia da absorção (processos, mecanismos e cinética) e da morfologia (comprimento, raio, pêlos radiculares, etc.) e distribuição do sistema radicular e suas interações com o solo, especialmente na rizosfera (Anghinoni e Meurer, 1999).

Primavesi et al. (2005) determinaram a absorção de cátions e ânions em plantas de capim-coastcross adubadas com doses elevadas de nitrogênio (100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> corte<sup>-1</sup> de N na forma de uréia (fonte de nitrogênio formadora de amônio) e nitrato de amônio (fonte de nitrogênio com 50% na forma nítrica e 50% na forma amoniacal) em condições de campo (pastagem cultivada com a realização de cinco cortes durante o experimento). A absorção de cátions e de ânions pelo capim-coastcross aumentou com o acréscimo das doses de nitrogênio dos dois fertilizantes, sendo maior com o nitrato de amônio.

A interação de nitrogênio com o potássio é a mais comum, enfatizando-se que esses dois nutrientes são absorvidos em maiores quantidades pela maior parte das culturas, sendo que a absorção de um elemento eleva a demanda pelo outro.

O aporte de nitrogênio resulta em estímulo ao crescimento das plantas, induzindo deficiência de potássio por efeito diluição. Desta forma, o fornecimento de nitrogênio e de potássio em quantidades balanceadas freqüentemente resulta em aumento da resposta a ambos nutrientes. Mas, adubações com maiores quantidades de nitrogênio ou potássio, em solos deficientes, podem causar decréscimos na resposta de um dos nutrientes (N ou K), tanto em produção quanto em acúmulo do nutriente nas plantas (Cantarella, 2007). Citado por Meurer (2006), alto teor de potássio na planta aumenta a taxa de absorção de nitrato e pode ocorrer a inibição de absorção de Ca e Mg (Marschner, 1995).

No caso do fósforo, o efeito mais relatado é o aumento da absorção deste nutriente, quando o nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) é aplicado no sulco de semeadura (Hanway e Olson, 1980). As interações entre o nitrogênio e fósforo resultam em um efeito sinérgico, onde ambos os nutrientes, em doses adequadas, promovem incrementos em produtividade maiores em relação aos obtidos com a aplicação de nitrogênio e fósforo de forma isolada (Shuman, 1994). Como a absorção de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é um processo ativo, requer energia metabólica para o transporte contra um gradiente potencial eletroquímico, havendo a necessidade de substâncias redutoras e ATP (Kleinhofs e Warner, 1990).

Desta forma, a limitação no fornecimento de fósforo pode resultar em menor taxa de absorção de nitrogênio, relatando-se, em milho, redução mais acentuada, principalmente na absorção de nitrato (Magalhães et al., 1995) e também na absorção de amônio (Alves et al., 1998). Fancelli e Tsumanuma (2007) indicam que em condições tropicais e subtropicais a disponibilidade adequada de fósforo para a geração de energia (ATP) é fundamental para a melhoria da eficiência de assimilação de nitrogênio, ou seja, a conversão de compostos inorgânicos de baixa energia em compostos de alta energia.

O nitrogênio na forma amoniacal, em altas concentrações no meio de cultivo, reduz a absorção de cálcio pelas raízes, efeito este que também ocorre com altas concentrações de potássio e magnésio (Vitti et al., 2006).

Experimentos em soluções nutritivas com três diferentes níveis de pH (5,5; 4,5 e 3,5) indicaram que o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), como única fonte de nitrogênio, resultou em impacto negativo significativo na absorção de cálcio e magnésio.

Este efeito foi independente da acidificação da rizosfera e diretamente relacionado com a absorção e assimilação de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) pelas plantas (Gloser e Gloser, 2000).

Segundo Cantarella (2007), o uso de fertilizantes sem enxofre muitas vezes resulta em redução no aproveitamento do nitrogênio e, de forma geral, a relação entre o nitrogênio e enxofre em plantas encontra-se na faixa de 8 a 12 para 1. Constituinte de dois aminoácidos (cisteína e metionina), a deficiência de enxofre resulta em diminuição da produção de proteínas.

Conseqüentemente, as plantas adubadas com doses insuficientes de enxofre não convertem o nitrogênio absorvido como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ou amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) na forma de proteínas, ocorrendo acúmulo de aminas, amidas e aminoácidos solúveis (Epstein e Bloom, 2005).

A absorção de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) pela planta libera prótons, enquanto a de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) produz ânions  $\text{OH}^-$ ; plantas supridas com amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) acidificam e aquelas nutridas com nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) alcalinizam a rizosfera (Bloom et al., 2003). Essas interações podem ser relevantes no caso de alguns micronutrientes, principalmente em solos, onde valores elevados de pH podem limitar a disponibilidade de micronutrientes metálicos (Wilkinson et al., 2000).

Segundo Dechen e Nachtigall (2006), o cobre é disponível para as plantas na forma de  $\text{Cu}^{2+}$  e Cu-quelato. O aumento do crescimento das plantas devido ao aporte de nitrogênio pode ser proporcionalmente maior do que a absorção de cobre, resultando a diluição da concentração de cobre nas plantas. O aumento do nitrogênio nas plantas também impede a translocação de cobre das folhas mais velhas para as mais novas (Tisdale et al., 2005).

A absorção de manganês pelas plantas ocorre na forma de  $\text{Mn}^{2+}$  (Dechen e Nachtigall, 2006). O uso de fertilizante nitrogenado amoniacal irá melhorar a absorção de manganês pela redução de pH da rizosfera (Tisdale et al., 2005).

As plantas absorvem o zinco na forma de  $\text{Zn}^{2+}$  pelas raízes ou pela parte aérea Dechen e Nachtigall (2006). A concentração de  $\text{Zn}^{2+}$  na solução do solo é muito baixa (2 a  $70 \mu\text{g L}^{-1}$ ) sendo que mais da metade está complexada pela matéria orgânica do solo. Além disso, a solubilidade do zinco é pH dependente, diminuindo com o aumento do pH.

Como resultado das interações do  $\text{Zn}^{2+}$  com a matéria orgânica do solo, reduções de 30 vezes para cada unidade de aumento no pH entre 5 a 7 tipicamente tem sido observados na solução do solo (Tisdale et al., 2005).

## 2.8 Toxidez de amônio em plantas

A utilização de doses de nitrogênio, aparentemente adequadas, podem desenvolver rapidamente, condições para a ocorrência de toxidez de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ou acúmulo de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) nos tecidos das plantas. Este fato indica que para o uso de fertilizantes nitrogenados, os fatores que afetam a fisiologia vegetal devem ser levados em consideração (Souza e Fernandes, 2006).

Köchy e Wilson (2001) relatam que em climas temperados, quando maiores quantidades de nitrogênio são depositadas em sistemas florestais na forma de nitrato ao invés de amônio, ocorre a expansão da floresta ao invés de sua redução (Köchy e Wilson 2001). O amônio afeta o desenvolvimento e crescimento das plantas (Walch-Liu et al., 2001; Britto e Kronzucker, 2002). As plantas podem sofrer a toxidez por amônio, quando o nitrogênio na forma amoniacal é a única fonte de nitrogênio (Zhang e Rengel, 1999, 2000, 2003).

As plantas cultivadas em agricultura mais sensíveis à toxidez de amônio (especialmente em termos de seu efeito na taxa de crescimento) incluem a cevada (Britto et al., 2001), feijão (Zhu et al., 2000), morango (Claussen e Lenz, 1999) e espécies de citros (Dou et al., 1999). Algumas plantas são mais adaptadas ao excesso de amônio como fonte de nitrogênio, como mirtilo e cranberry (Claussen e Lenz 1999), além do chá - *Camellia sinensis* (Ruan et al., 2007). O amônio também foi relatado como sendo superior ao nitrato no crescimento de arroz (Qian et al., 2004) e pimentão (Xu et al., 2001). Mesmo espécies tolerantes à nutrição com amônio podem apresentar sintomas de toxidez, como resposta a uma alta dose de nitrogênio na forma amoniacal (Britto e Kronzucker, 2002).

Sintomas visuais geralmente incluem a redução da relação raiz:folha das plantas (Bauer e Berntson, 1999). Sintomas não prontamente visíveis, mas igualmente importantes, incluem o declínio das associações micorrízicas (Boukcim et al., 2001, Hawkins e George, 2001).

Considerando-se que, plantas eventualmente possam metabolizar quantidades significativas de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), liberadas pela fotorrespiração, sem exibir sinais de toxidez, a nutrição vegetal exclusivamente com nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), via sistema radicular, pode afetar negativamente o metabolismo das plantas, comparando-se com plantas com nutrição nitrogenada exclusivamente com nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ou com a combinação de nitrogênio na forma amoniacal e nítrica (Souza e Fernandes, 2006).

Taiz e Zeiger (2004) citam que, em comparação com o nitrato, o aumento do fornecimento de amônio pode atingir níveis tóxicos, tanto para as plantas quanto para animais. O amônio é capaz de dissipar os gradientes de prótons transmembrana (Figura 4) necessário para o transporte de elétrons na fotossíntese e respiração, além da captura de metabólitos nos vacúolos. O lado direito representa o lume, o espaço intermembrana ou o vacúolo, onde o pH é mais baixo; a membrana representa o tilacóide do cloroplasto, a membrana interna mitocondrial ou o tonoplasto do vacúolo de uma célula de raiz. As concentrações de  $\text{OH}^-$  do lado esquerdo e de  $\text{H}^+$  do lado direito diminuíram, isto é, o gradiente de pH foi dissipado (segundo Bloom, 1997).

Contraditoriamente, as desordens no pH intracelular, propostas como mecanismos de toxidez por amônio têm sido largamente rejeitadas por estudos utilizando ressonância nuclear magnética e marcadores fluorescentes (Gerendas e Ratcliffe, 2000). Britto e Kronzucker (2002) sugerem que a toxidez por amônio em plantas pode ocorrer, porque as plantas gastam grandes quantidades de energia no efluxo de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) para manter a baixa concentração deste cátion no citoplasma.

Geralmente, plantas nutridas com amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) apresentam menor área foliar (Walch-Liu et al., 2000) e baixo índice de área foliar (Guo, 2001) em comparação à plantas em que a nutrição nitrogenada foi realizada com nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Este efeito desfavorável pode ser atribuído à regulação hormonal entre as raízes e parte aérea das plantas (Walch-Liu et al., 2000).



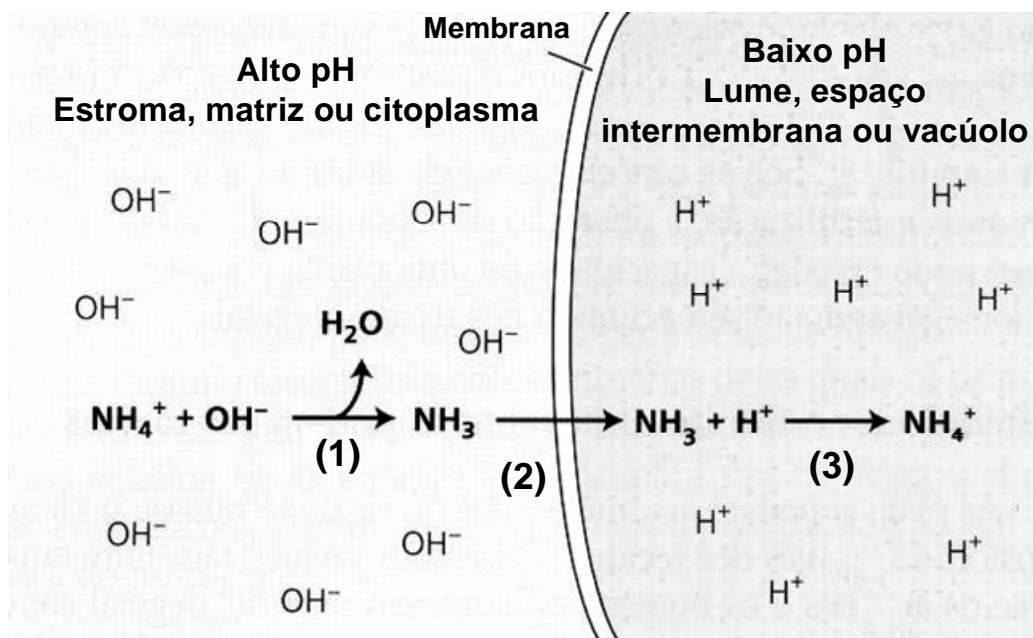


Figura 4. Toxicidade do  $\text{NH}_4^+$ .

Clorose, necrose e até a morte das plantas são considerados sintomas de toxidez de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). A ocorrência desses sintomas depende da concentração de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) nos tecidos, da relação  $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$  e da concentração de outros nutrientes nas plantas.

Além disso, como a assimilação de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ocorre basicamente nas raízes e requer grandes quantidades de carboidratos, plantas nutridas exclusivamente com nitrogênio na forma amoniacal, manifestam redução na taxa de crescimento das raízes (Souza e Fernandes, 2006).

Outros pesquisadores indicam também que o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) fornecido como fonte exclusiva de nitrogênio inibe o crescimento, comparado a uma nutrição com nitrogênio nítrico ( $\text{NO}_3^-$ ) ou mistura de amônio e nitrato (Claussen e Lenz, 1999; Walch-Liu et al., 2000; Guo, 2001, 2002).

A germinação de sementes e o estabelecimento de plântulas também podem ser inibidos pela toxidez de amônio (Westwood e Foy, 1999).

Amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ao invés de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), como fonte de nitrogênio para fumo (*Nicotiana Tabacum L.*) cultivado em solução nutritiva tamponada resultou em redução da biomassa da parte aérea e de raízes (Walch-Liu et al., 2000).

A redução da massa fresca de folhas foi principalmente relacionada com a inibição do crescimento foliar. Não foi constatado efeito inibidor quando amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) foram aplicados simultaneamente.

Estas informações sugerem que a rápida inibição no crescimento foliar não foi primariamente relacionada com a toxidez por amônio, mas sim pela falta de suprimento de nitrato (Walch-Liu et al., 2000).

Por outro lado, o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é reconhecido por minorar a toxidez por amônio, mas os mecanismos são desconhecidos (Babourina et al., 2006). Uma possível explicação para a amenização da toxidez por amônio pelo nitrato é baseada na habilidade do nitrato em aumentar a expressão de enzimas que removem o amônio do citoplasma (Redinbaugh e Campbell, 1993; Kronzucker et al., 1999).

Comunidades vegetais com dosséis densos, e radiação incidente e fotossíntese concentrada na parte superior, com o aumento da temperatura do ar, aumentam a taxa de respiração. Desta forma, existe a possibilidade da ocorrência de estresse pela baixa fotossíntese e aumento da respiração. O resultado é o consumo de maiores quantidades de carboidratos, e conseqüentemente, redução no suprimento de esqueletos de carbono, os quais são utilizados na incorporação do nitrogênio amoniacal na forma de aminoácidos (glutamato e glutamina).

Finalmente, cabe a citação de Malavolta (2006), que diz haver alguma controvérsia na literatura e no comércio de fertilizantes, a respeito da forma de N “preferida” pela planta. O assunto foi discutido no livro de Mackee (1962). Beevers e Hagemann (1983, p.356) concluem: “... freqüentemente observado que as plantas crescem [e produzem] melhor numa mistura de fontes inorgânicas de N [nitrato e amoniacal]. Os colchetes foram interpolados por Malavolta.

A presente revisão abordou o conhecimento atual sobre as formas químicas do nitrogênio em fertilizantes, a absorção e as interações com outros nutrientes. Incluíram ainda a assimilação no ambiente intracelular e o gasto energético para cada forma nitrogênio, e seus efeitos no desenvolvimento radicular e vegetativo das plantas.

Assim sendo, com base nestes fatos e necessidades atuais e futuras, foram formuladas as seguintes hipóteses para nortear a execução deste trabalho:

1. avaliar o desenvolvimento da parte aérea das plantas de milho é influenciado diferentemente, na presença de nitrogênio nítrico ou amoniacal, ou ambos;
2. avaliar o acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, enxofre e de micronutrientes na parte aérea das plantas é influenciado diferentemente, na presença de nitrogênio nítrico ou amoniacal, ou ambos;
3. a nitrapirina inibe a nitrificação do amônio no solo.

Assim, os objetivos propostos para aceitar ou refutar estas hipóteses são:

- a) avaliar o desenvolvimento da parte aérea de plantas de milho submetidas à adubação nitrogenada sob as formas de N-nítrico, N-amoniacal e N-amídico (fonte formadora de N-amoniacal) na ausência ou presença de inibidor da nitrificação (nitrapirina);
- b) avaliar o acúmulo de nutrientes na parte aérea de milho submetido à adubação nitrogenada, com as formas de N-nítrico, N-amoniacal e amídica (fonte formadora de N-amoniacal), na ausência ou presença de inibidor da nitrificação (nitrapirina).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi conduzido em casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e instalado em outubro de 2007, em delineamento completamente casualizado, com dez tratamentos e três repetições, totalizando 30 vasos. O experimento constou de um cultivo de milho em vasos por 30 dias.

Foi utilizada uma amostra superficial (0-20 cm de profundidade) de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (Embrapa, 1999), coletado no município de Viamão, RS, pertencente à unidade de mapeamento Itapoã. A escolha do solo foi baseada nos baixos valores de argila, de CTC e principalmente de matéria orgânica, objetivando a minimização da liberação de nitrogênio amoniacal oriundo da mineralização da matéria orgânica e, desta forma possibilitando a melhor avaliação de resposta das plantas aos tratamentos com nitrogênio sem e com inibidor de nitrificação.

A amostra de solo foi seca ao ar e passada em peneira de 2 mm de abertura. Na Tabela 2 encontram-se os resultados das análises de alguns atributos da amostra deste solo, determinados conforme métodos descritos por Tedesco et. Al. (1995).

TABELA 2. Alguns atributos da amostra superficial (20 cm de profundidade) de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (Embrapa, 1999), coletado no município de Viamão, RS, pertencente a unidade de mapeamento Itapoã, antes da correção com carbonato de cálcio

| Argila                         | Matéria orgânica | pH H <sub>2</sub> O | Índice SMP | P                              | K                              | S <sup>-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>   | Ca <sub>troc</sub>                             | Mg <sub>troc</sub>              | Al <sub>troc</sub>              | CTC                             | B                               | Cu                              | Mn                              | Zn                              |
|--------------------------------|------------------|---------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ----- g kg <sup>-1</sup> ----- |                  |                     |            | ----- mg dm <sup>-3</sup> ---- | ----- mg dm <sup>-3</sup> ---- | ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----- | ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----- | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- |
| 100                            | 11               | 5,4                 | 6,0        | 43                             | 87                             | 7,5  | 2,8  | 0,5                             | 0,6                             | 4,5                             | 0,3                             | 0,4                             | 0,5                             | 0,6                             |

### 3.1 Preparo do solo

O solo recebeu uma mistura, na relação molar 3:1, de carbonato de cálcio com carbonato de magnésio na dose equivalente a 500 kg ha<sup>-1</sup>. A quantidade utilizada teve como objetivo de manter o pH (em água) em faixa adequada para o desenvolvimento vegetal (pH em torno de 5,5) e de evitar a possibilidade da ocorrência de volatilização de amônia do solo nos tratamentos com nitrogênio amoniacal. Adicionou-se suficiente quantidade de água para atingir aproximadamente 80% da capacidade de campo. Porções de 18 kg do solo, assim tratadas, foram acondicionadas em sacos de polietileno. Deixou-se o solo reagir com o carbonato de cálcio e magnésio por um período de 30 dias, durante o qual foi revolvido a cada cinco dias. A cada sete dias mediu-se o pH em água até que ocorresse a sua estabilização (pH 5,5), o que aconteceu 20 dias após a calagem. Na Tabela 3 encontram-se os resultados das análises de alguns atributos da amostra do solo, após a correção do solo com carbonato de cálcio, determinados conforme métodos descritos por Tedesco et. al. (1995).

#### 3.1.1 Aplicação da adubação básica, do nitrogênio e nitrapirina no solo

O solo foi dividido em amostras com peso seco equivalente a 5,3 kg para cada unidade experimental. A estas amostras foi aplicada adubação básica de 100 mg de P kg<sup>-1</sup> de solo e 124 mg de K kg<sup>-1</sup> de K na forma de fosfato monopotássico (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), 10 mg S kg<sup>-1</sup> de solo na forma de sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). Os micronutrientes foram aplicados na dose de 0,20 mg de B kg<sup>-1</sup> de solo na forma de ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>); 0,10 mg de Cu kg<sup>-1</sup> de solo na forma de sulfato de cobre pentahidratado (CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O); 3,0 mg de Fe kg<sup>-1</sup> de solo na forma de sulfato de ferro heptahidratado (Fe<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O); 3,0 mg de Mn kg<sup>-1</sup> de solo na forma de sulfato de manganês monohidratado (Fe<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O); 0,1 mg de Mo kg<sup>-1</sup> de solo na forma de molibdato de sódio (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) e 3,0 mg de Zn kg<sup>-1</sup> de solo na forma de sulfato de zinco heptahidratado (Zn<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O).

Após a aplicação da adubação básica, as amostras de solo foram acondicionadas nas unidades experimentais, correspondendo a vasos montados com PVC rígido de 15 cm de diâmetro, 32 cm de altura e com fundo

de tela sintética (Figura 5), afixada com anel de borracha e com acabamento em fita adesiva permitindo a drenagem livre da água.

No fundo de cada unidade experimental foi depositado 250 g de pedra britada lavada, objetivando evitar a perda de solo sobre os pratos coletores de solução do solo após lixiviação (pratos plásticos com 20 cm de diâmetro com 2,6 cm de altura).



Figura 5. Vista das unidades experimentais com as plantas de milho após o desbaste em casa-de-vegetação, e individualmente com detalhes do sistema de fechamento do fundo.

Imediatamente após o solo ter sido acondicionado em cada unidade experimental, as fontes de nitrogênio, sem e com o inibidor de nitrificação (nitrapirina), foram aplicadas por meio de um cano de PVC rígido de 2 cm de diâmetro com 40 cm de altura introduzido no centro de cada unidade experimental. Este cano foi perfurado em diversos pontos de maneira idêntica para todas as unidades experimentais, a partir de 15 cm da base e a cada 5 cm até 5 cm abaixo da superfície do solo.

Desta forma, as fontes de nitrogênio (sem e com nitrapirina) foram aplicadas após a dissolução em água (50 mL) com auxílio de um funil encaixado a cada cano perfurado no centro de cada unidade experimental. Imediatamente após a aplicação do nitrogênio, foi aplicada em cada unidade

experimental mais 100 mL de água destilada para promover a distribuição dos fertilizantes sem e com inibidor de nitrificação.

Os tratamentos utilizados com as fontes de N sem e com inibidor de nitrificação e as respectivas doses de N e de princípio ativo do inibidor estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Tratamentos com as fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina) utilizadas no cultivo de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação

| Sigla   | Tratamento  | Fonte de N        | mg N kg <sup>-1</sup> de solo |
|---|---|-------------------|-------------------------------|
| Sem nitrapirina   |   |                   |                               |
| T1  | Testemunha sem N  | -                 | -                             |
| T2  | N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | Nitrato de cálcio | 120                           |
| T3  | N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | Cloreto de amônio | 120                           |
| T4  | N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Nitrato de amônio | 120                           |
| T5  | N 100% amídico [CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ]                   | Uréia             | 120                           |
| Com nitrapirina (8 mg kg solo <sup>-1</sup> ) – N Serve (Dow Agrosiences) |   |                   |                               |
| T6  | Testemunha sem N  | -                 | -                             |
| T7  | N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | Nitrato de cálcio | 120                           |
| T8  | N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | Cloreto de amônio | 120                           |
| T9  | N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Nitrato de amônio | 120                           |
| T10   | N 100% amídico [CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ]                   | Uréia             | 120                           |

Após a aplicação do nitrogênio (sem e com nitrapirina), as unidades experimentais foram irrigadas com água deionizada até manter a umidade a 80% da capacidade de campo. Esta umidade foi mantida até o final do experimento, aferindo-se o peso dos vasos a cada 2 dias.

### 3.1.2 Condução do experimento em casa-de-vegetação

Foi realizado um cultivo de milho (*Zea mays* L.), semeando-se 5 sementes Pioneer variedade 30F53 por unidade experimental. Após cinco dias da emergência, foi realizado o desbaste, resultando em duas plantas viáveis por vaso.



Aos 30 dias após a semeadura, as plantas de milho foram colhidas, cortando-as rente a superfície do solo. O material colhido foi transferido para sacos de papel. Após atingir peso constante em estufa a 60°C, o material foi pesado e analisado. As determinações dos macronutrientes N, P, K, Ca e Mg no tecido das plantas foram realizadas no extrato de digestão das amostras com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado + mistura de digestão. Para nitrogênio total, o método utilizado foi o Kjeldahl (nitrogênio TKN). Para a extração de N na forma de amônio [N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>] e nas formas de nitrato e de nitrito [N-(NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)], utilizou-se solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. Para a extração do [N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>], utilizou-se o óxido de magnésio calcinado. Para a redução de nitrato e de nitrito a amônio utilizou-se liga Devarda. Os micronutrientes Cu, Mn e Zn foram determinados no extrato com HNO<sub>3</sub> + HClO<sub>4</sub> (digestão nítrico-perclórica). Todas as determinações foram realizadas conforme Tedesco et al. (1995).

### **3.1.3 Análise estatística**

Na análise de variância dos resultados, quando os valores de F foram significativos ao nível de 5 % de probabilidade, submeteu-se ao Teste de Duncan (p<0,05), usando o pacote estatístico SAS (SAS, 1989).

Na análise estatística de todos os resultados foi avaliada a interação entre a o inibidor de nitrificação (nitrapirina) e as fontes de nitrogênio. Os parâmetros estatísticos (F tratamento e coeficiente de variação) são apresentados no Apêndice 13.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho foi avaliada a eficácia de um inibidor da nitrificação associado a fontes de nitrogênio em cultivo de milho. Quantificaram-se os teores de massa seca produzida pelo milho nos tratamentos, a absorção de nitrogênio e os teores de macronutrientes e micronutrientes no tecido da parte aérea das plantas.

### 4.1 Produção de matéria seca da parte aérea

A aplicação da nitrapirina ao argissolo não afetou o rendimento de matéria seca da parte aérea das plantas de milho, independente da fonte de nitrogênio suprida às plantas. A produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 4) diferiu significativamente entre os tratamentos, situando-se entre 11,35 e 20,06 g vaso<sup>-1</sup>. O maior rendimento de matéria seca ocorreu com o suprimento de N na forma de nitrato de amônio (50% NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Excetuando a testemunha, os menores rendimentos foram obtidos quando o nitrogênio foi aplicado totalmente na forma amoniacal (100% NH<sub>4</sub>) e na forma amídica [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>], que não diferiram estatisticamente entre si.

Os resultados obtidos com o suprimento do nitrogênio na forma de nitrato de amônio corroboram com os dados relatados na literatura, ou seja, a melhoria no desenvolvimento das plantas (Ali et al., 2001; Andrade et al., 2001; Briones et al., 2003; Chen et al., 2005; Duan et al., 2006, 2007; Kirk e Kronzucker, 2005; Kronzucker et al., 1999, 2000; Li et al., 2006; Thomas e Sodek, 2005; Tisdale et al., 2005).

Por outro lado, a menor produção de matéria seca obtida nos tratamentos com o nitrogênio suprido na forma de nitrato (100%  $\text{NO}_3^-$ ), sugere que o aporte de  $\text{N-NO}_3^-$  resultou em maior gasto de energia para a assimilação do N (von Wiren, 2000).

Os dados também estão em conformidade com Fancelli e Tsumanuma (2007), os quais citam que a disponibilidade adequada de nitrogênio na fase inicial de crescimento das plantas, associada ao equilíbrio entre a forma amoniacal e nítrica, constitui-se em requisito fundamental para o crescimento e funcionamento do sistema radicular, o que explicaria o maior acúmulo de matéria seca obtidos no tratamento em que o nitrogênio foi aplicado como nitrato de amônio (50%  $\text{NO}_3^-$  + 50%  $\text{NH}_4^+$ ).

TABELA 4. Matéria seca acumulada da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                              | Matéria seca, g vaso <sup>-1</sup> |                 | Médias  |
|--|------------------------------------|-----------------|---------|
|  | Sem Nitrapirina                    | Com Nitrapirina |         |
| Testemunha                               | 11,35                              | 12,17           | 11,76 d |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                   | 16,30                              | 18,49           | 17,40 b |
| N 100% $\text{NH}_4$                     | 15,19                              | 15,38           | 15,29 c |
| N 50 $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4$ | 20,06                              | 19,31           | 19,69 a |
| N 100% amídico                           | 16,26                              | 15,30           | 15,78 c |
| Médias <sup>ns</sup>                     | 15,83                              | 16,13           |         |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Nos tratamentos N 100% amídico [ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ] e N 100%  $\text{NH}_4^+$ , os dados sugerem que a nitrificação não transformou todo o  $\text{N-NH}_4^+$  em  $\text{N-NO}_3^-$  no período de 30 dias, resultando em possível efeito tóxico do amônio, o que resultou redução no desenvolvimento das plantas. Esta constatação está em conformidade com os dados da literatura, os quais relatam à toxicidade do nitrogênio amoniacal (Britto e Kronzucker, 2002; Claussen e Lenz, 1999; Guo, 2001, 2002; Souza & Fernandes, 2006; Taiz & Zeiger, 2004; Walch-Liu et al., 2000, 2001; Zhang e Rengel, 1999, 2000, 2003).

Os resultados dos tratamentos testemunha sem N (T1 e T6) ocorreu clorose gradual das folhas mais velhas, tornando-se generalizada pela deficiência do nitrogênio, ocorrendo redução do crescimento das plantas de milho (Figura 6).

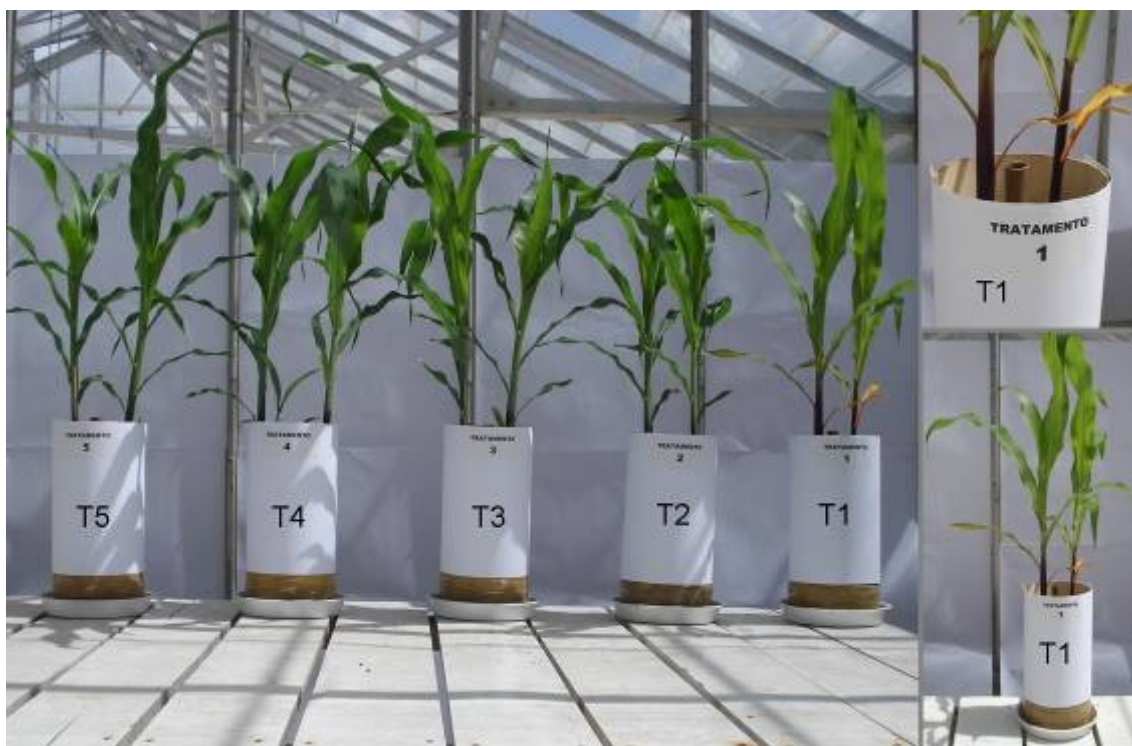


FIGURA 6. Plantas de milho cultivadas em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem inibidor de nitrificação (nitrapirina), com detalhe para a deficiência de N no tratamento testemunha (T1).

Além disso, os dados permitem concluir que a nitrapirina não causou efeito tóxico para as plantas (Figura 7).

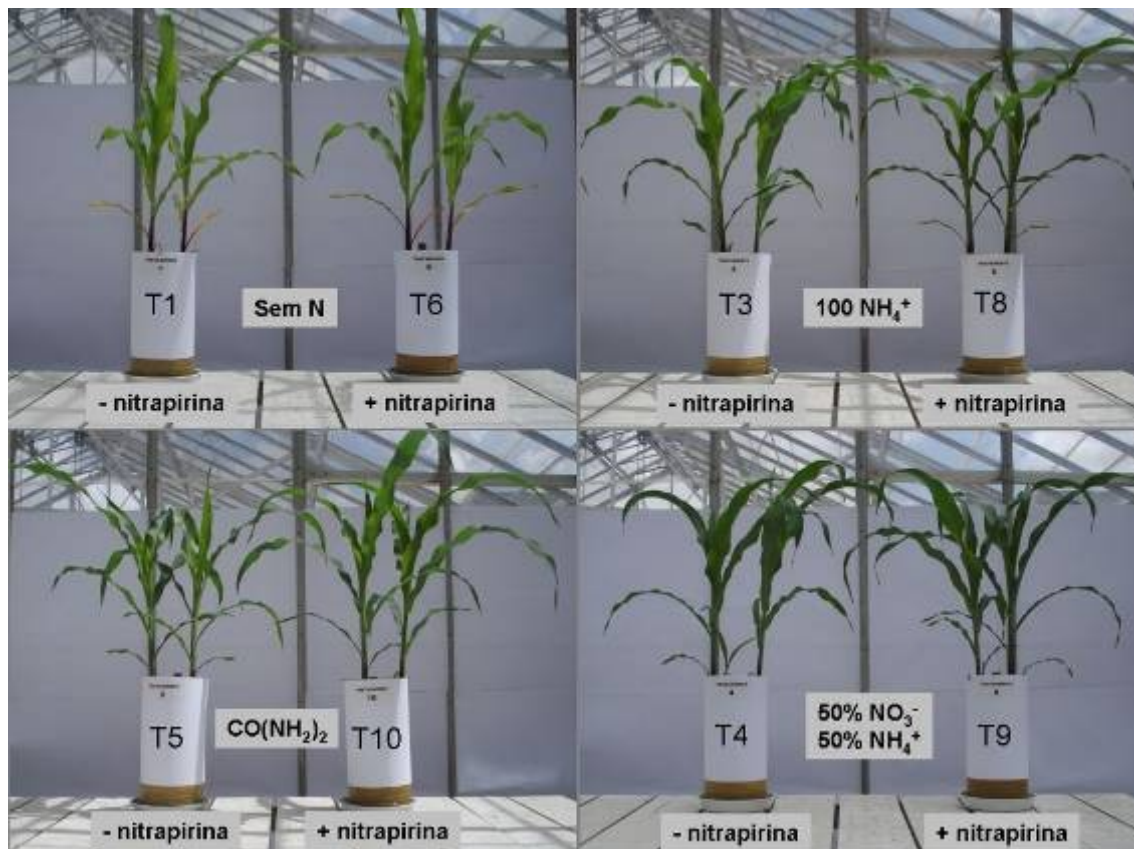


FIGURA 7. Plantas de milho cultivadas em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina).

#### 4.2 Nitrogênio total acumulado na parte aérea do milho

O nitrogênio total acumulado na parte aérea das plantas (Tabela 5) diferiu significativamente entre os tratamentos, situando-se entre 87 e 547 mg vaso<sup>-1</sup>. Houve interação significativa entre o uso da nitrapirina e as fontes de nitrogênio, ou seja, a eficiência das fontes de N foi diferente na presença do inibidor da nitrificação. O uso da nitrapirina resultou em maior acúmulo de nitrogênio na parte aérea das plantas (Tabela 5).

Nos tratamentos sem nitrapirina, os maiores acúmulos de nitrogênio na parte aérea das plantas ocorreram com a aplicação do nitrato de amônio (N 50% NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e do nitrogênio na forma amoniacal (N 100% NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

TABELA 5. Nitrogênio total acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                                 | N-total, mg vaso <sup>-1</sup> |        | Médias |
|---|--------------------------------|--------|--------|
|   | Nitrapirina                    |        |        |
|   | Sem                            | Com    |        |
| Testemunha                                  | 87 c                           | 104 d  | 94     |
| N 100% NO <sub>3</sub>                      | 394 b                          | 525 ab | 460    |
| N 100% NH <sub>4</sub>                      | 494 a                          | 479 bc | 487    |
| N 50% NO <sub>3</sub> + 50% NH <sub>4</sub> | 500 a                          | 547 a  | 524    |
| N100% amídico                               | 417 b                          | 467 c  | 442    |
| Médias                                      | 378 B                          | 424 A  |        |

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade.

Nos tratamentos com nitrapirina, o maior acúmulo de nitrogênio no tecido das plantas ocorreu no tratamento com N 50% NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Os menores acúmulos de N ocorreram nos tratamentos Testemunha (sem N), confirmando a baixa disponibilidade do nutriente no argissolo.

Os tratamentos com nitrato de amônio (N 50% NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sem e com nitrapirina) indicam que o N na forma amoniacal não interferiu na absorção do N na forma de nitrato, não estando em conformidade com Kronzucker et al. (1999), o qual cita que absorção de nitrato pelas raízes é rapidamente inibida pela exposição ao amônio. Os dados estão de acordo com o observado por Fancelli e Tsumanuma (2007), que citam que o equilíbrio entre as formas de N amoniacal e nítrica, constitui-se em requisitos fundamentais para o crescimento e funcionamento do sistema radicular.

Finalmente, a quantidade de nitrogênio absorvido pelas plantas foi maior na presença da nitrapirina, porém não resultando em aumento da matéria seca. Este fato não está em conformidade com Tisdale et al. (2005), os quais citam que o crescimento vegetal é melhorado quando as plantas são nutridas com nitrato e amônio, comparado com o suprimento apenas de nitrato ou de amônio.

#### **4.3 N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> acumulados na parte aérea**

Os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no tecido da parte aérea das plantas de milho não diferiram significativamente entre os tratamentos, sem ou com a adição de nitrapirina ao solo.

Porém, os teores de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nos tecidos diferiram significativamente entre os tratamentos, sem e com a adição da nitrapirina (Tabela 6). Com exceção do tratamento em que o nitrogênio foi suprido predominantemente na forma de nitrato (N 100% NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), a adição da nitrapirina ao solo resultou numa absorção significativamente menor de N-NH<sub>4</sub> nos demais tratamentos. Esperava-se que com a adição da nitrapirina ao solo, inibindo a nitrificação do amônio, a absorção do N-NH<sub>4</sub> pelas plantas de milho fosse maior, ao contrário do verificado; entretanto, o rendimento de matéria seca da parte aérea, sem e com o inibidor, não foi afetado, embora o suprimento do nitrogênio na forma amoniacal tenha resultado, na média, num rendimento inferior de matéria seca (Tabela 4).

TABELA 6. N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> acumulados na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos  | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>    |     |        | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> |       |    |
|--|-----------------------------------|-----|--------|--------------------------------|-------|----|
|  | ..... µg vaso <sup>-1</sup> ..... |     |        |                                |       |    |
|  | Nitrapirina                       |     |        | Nitrapirina                    |       |    |
|  | Sem                               | Com | Médias | Sem                            | Com   |    |
| Testemunha sem N   | 33                                | 17  | 25 b   | 42 b                           | 24    | c  |
| N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                  | 96                                | 114 | 105 a  | 265 b                          | 417   | b  |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                  | 173                               | 142 | 157 a  | 2674 a                         | 1907  | a  |
| N 50%NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 136                               | 109 | 122 a  | 372 b                          | 191   | bc |
| N 100% amídico   | 93                                | 100 | 96 a   | 280 b                          | 64    | c  |
| Médias   |                                   |     |        | 726 A                          | 520 B |    |

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade.

#### 4.4 Potássio, cálcio e magnésio acumulados na parte aérea

Não houve interação significativa entre o uso da nitrapirina e as fontes de nitrogênio para o cálcio e o potássio acumulados na parte aérea das plantas de milho. No entanto, para o magnésio houve interação significativa entre as fontes de nitrogênio e o inibidor da nitrificação.

Com exceção do tratamento em que o nitrogênio foi suprido na forma amídica (uréia) no qual a absorção de potássio igualou-se a da testemunha, o potássio acumulado na parte aérea das plantas nos demais tratamentos não diferiu estatisticamente entre as fontes de nitrogênio (Tabela 7).



No caso do cálcio o maior acúmulo deste nutriente no tecido da parte aérea das plantas ocorreu no tratamento em que o nitrogênio foi suprido predominantemente na forma de nitrato (N 100% NO<sub>3</sub>).

Possivelmente o fornecimento do nitrogênio para as plantas na forma amídica afetou a absorção do cálcio, desde que a absorção deste nutriente, neste caso, foi significativamente inferior, de 54 mg por vaso (Tabela 8).

TABELA 7. Potássio acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                                 | K, mg vaso <sup>-1</sup> |     | Médias |
|---|--------------------------|-----|--------|
|   | Nitrapirina              |     |        |
|   | Sem                      | Com |        |
| Testemunha                                  | 308                      | 365 | 337 b  |
| N 100% NO <sub>3</sub>                      | 402                      | 439 | 420 a  |
| N 100% NH <sub>4</sub>                      | 412                      | 393 | 403 a  |
| N 50% NO <sub>3</sub> + 50% NH <sub>4</sub> | 415                      | 431 | 423 a  |
| N100% amídico                               | 376                      | 362 | 369 b  |
| Médias <sup>ns</sup>                        | 383                      | 398 |        |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A absorção de magnésio foi maior quando o nitrogênio foi suprido na forma de nitrato de amônio, tanto na ausência como na presença da nitrapirina (Tabela 9). Similarmente, como no caso do cálcio, a adição ao argissolo de nitrogênio na forma amídica resultou numa diminuição na absorção do magnésio pelas plantas de milho.

TABELA 8. Cálcio acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                                 | Ca, mg vaso <sup>-1</sup> |     | Médias |
|---|---------------------------|-----|--------|
|   | Nitrapirina               |     |        |
|   | Sem                       | Com |        |
| Testemunha                                  | 27                        | 29  | 28 d   |
| N 100% NO <sub>3</sub>                      | 103                       | 122 | 113 a  |
| N 100% NH <sub>4</sub>                      | 89                        | 88  | 89 b   |
| N 50% NO <sub>3</sub> + 50% NH <sub>4</sub> | 80                        | 83  | 82 b   |
| N100% amídico                               | 54                        | 53  | 54 c   |
| Médias <sup>ns</sup>                        | 71                        | 75  |        |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 9. Magnésio acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                                 | Mg, mg vaso <sup>-1</sup> |      | Médias |
|---|---------------------------|------|--------|
|   | Nitrapirina               |      |        |
|   | Sem                       | Com  |        |
| Testemunha                                  | 23 d                      | 24 c | 23     |
| N 100% NO <sub>3</sub>                      | 56 c                      | 69 a | 63     |
| N 100% NH <sub>4</sub>                      | 73 ab                     | 65 a | 69     |
| N 50% NO <sub>3</sub> + 50% NH <sub>4</sub> | 75 a                      | 71 a | 73     |
| N100% amídico                               | 60 bc                     | 54 b | 57     |
| Médias <sup>ns</sup>                        | 57                        | 57   |        |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade

#### 4.5 Fósforo e enxofre acumulados na parte aérea

Não houve interação significativa entre o uso da nitrapirina e as fontes de nitrogênio para o fósforo e para o enxofre acumulados na parte aérea do milho.

A absorção do fósforo pelas plantas foi significativamente maior quando o nitrogênio foi suprido na forma amoniacal. Quando o nitrogênio foi suprido predominantemente na forma nítrica (N 100% NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) o fósforo acumulado nos tecidos do milho igualou-se com a quantidade acumulada no tratamento testemunha (Tabela 10).

Em conformidade com os relatos da literatura (Hanway e Olson, 1980), os quais citam o efeito sinérgico entre o cátion amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e os ânions ortofosfato (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), os tratamentos com N 100% NH<sub>4</sub><sup>+</sup> resultaram nos maiores acúmulos de P.

Este efeito é notado em menor intensidade nos tratamentos com N amídico, o qual é uma fonte de N formadora de  $\text{NH}_4^+$  e também nos tratamentos com N 50%  $\text{NO}_3^-$  + 50%  $\text{NH}_4^+$ . Por outro lado, a absorção de  $\text{NO}_3^-$  nos tratamento com N 100%  $\text{NO}_3^-$ , indica a redução da absorção dos ânions ortofosfato resultante da maior disponibilidade de ânions  $\text{OH}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$  excretados pelas plantas com a absorção de nitrato (MacBride, 1994).

A adição de nitrapirina ao argissolo não afetou a absorção de enxofre pelas plantas de milho. A maior absorção do enxofre ocorreu no tratamento com o suprimento de nitrogênio na forma de nitrato de amônio. As quantidades de enxofre absorvidas pelas plantas de milho nos demais tratamentos não diferiram do tratamento testemunha (Tabela 11).

TABELA 10. Fósforo acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                             | P, mg vaso <sup>-1</sup> |      | Médias |
|---|--------------------------|------|--------|
|   | Nitrapirina              |      |        |
|   | Sem                      | Com  |        |
| Testemunha                              | 50                       | 61   | 55 c   |
| N 100% $\text{NO}_3$                    | 53                       | 64   | 59 c   |
| N 100% $\text{NH}_4$                    | 103                      | 109  | 106 a  |
| N 50% $\text{NO}_3$ + 50% $\text{NH}_4$ | 83                       | 92   | 88 b   |
| N100% amídico                           | 81                       | 82   | 82 b   |
| Médias                                  | 74 B                     | 82 A |        |

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 11. Enxofre acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                                 | S, mg vaso <sup>-1</sup> |     | Médias |
|---|--------------------------|-----|--------|
|   | Nitrapirina              |     |        |
|   | Sem                      | Com |        |
| Testemunha                                  | 28                       | 32  | 30 b   |
| N 100% NO <sub>3</sub>                      | 39                       | 39  | 34 b   |
| N 100% NH <sub>4</sub>                      | 29                       | 29  | 31 b   |
| N 50% NO <sub>3</sub> + 50% NH <sub>4</sub> | 43                       | 43  | 43 a   |
| N100% amídico                               | 38                       | 38  | 34 b   |
| Médias <sup>ns</sup>                        | 33                       | 36  |        |

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

#### 4.6 Cobre, manganês e zinco acumulados na parte aérea

Houve interação significativa entre a utilização da nitrapirina e as fontes de nitrogênio para cobre e manganês. Não houve interação significativa para o zinco.

A absorção do cobre pelas plantas nos tratamentos sem nitrapirina, foi maior quando a fonte nitrogenada utilizada foi o nitrato de amônio (N 50% NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e o sulfato de amônio (N 100% NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Este tratamento foi estatisticamente similar ao com N 100% amídico (Tabela 12).

Na presença da nitrapirina, a maior absorção de cobre pelas plantas ocorreu com a fonte nitrogenada com N 50% NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 50% NH<sub>4</sub><sup>+</sup> que não diferiu do tratamento em que o nitrogênio foi suprido na forma amoniacal.

TABELA 12. Cobre acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                                 | Cu, $\mu\text{g vaso}^{-1}$ |        |
|---|-----------------------------|--------|
|   | Nitrapirina                 |        |
|   | Sem                         | Com    |
| Testemunha                                  | 99 d                        | 119 d  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 184 c                       | 244 b  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 248 ab                      | 231 bc |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 254 a                       | 285 a  |
| N100% amídico                               | 222 b                       | 184 c  |
| Médias <sup>ns</sup>                        | 213                         | 202    |

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade

Para Mn, os maiores acúmulos ocorreram nos tratamentos sem e com a aplicação de nitrapirina quando a fonte de nitrogênio utilizada foi amoniacal (N 100%  $\text{NH}_4^+$ ). Tanto na presença como na ausência da nitrapirina a utilização do nitrogênio predominantemente na forma nítrica (N 100%  $\text{NO}_3^-$ ) e na forma amoniacal inibiram a absorção do manganês pelas plantas de milho (Tabela 13).

A nitrapirina não afetou a absorção de zinco pelas plantas. Os maiores acúmulos de zinco foram encontrados com N 100%  $\text{NH}_4^+$  e as menores quantidades de zinco acumuladas na parte aérea, quando se empregou nitrogênio na forma de nitrato (N 100%  $\text{NO}_3^-$ ).

TABELA 13. Manganês acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                                 | Mn, mg vaso <sup>-1</sup> |        |
|---|---------------------------|--------|
|   | Nitrapirina               |        |
|   | Sem                       | Com    |
| Testemunha                                  | 0,92 d                    | 0,99 d |
| N 100% NO <sub>3</sub>                      | 1,22 d                    | 1,27 d |
| N 100% NH <sub>4</sub>                      | 9,47 a                    | 8,98 a |
| N 50% NO <sub>3</sub> + 50% NH <sub>4</sub> | 4,12 c                    | 4,01 c |
| N100% amídico                               | 6,77 b                    | 4,77 b |
| Médias                                      | 4,50 A                    | 4,01 B |

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade.

Os dados encontrados para Mn e Zn podem ser explicados por Bloom et al. (2003). A absorção de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pela planta libera prótons, enquanto a de nitrato produz ânions OH<sup>-</sup>; plantas supridas com amônio acidificam e aquelas nutridas com nitrato alcalinizam a rizosfera. Desta forma, a acidificação ou alcalinização do meio resultou em maior ou menor disponibilidade de Mn e Zn para as plantas (Tabela 14). A maior disponibilidade destes micronutrientes devido à nutrição com amônio está em conformidade com Tisdale et al. (2005).

Estes efeitos não foram claramente observados para o cobre. O efeito diluição provocado pela absorção de N nos tratamentos com maior produção de matéria seca citado por Dechen e Nachtigall (2006), também não foi observado.

TABELA 14. Zinco acumulado na parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com inibidor de nitrificação (nitrapirina)

| Tratamentos                                 | Zn, mg vaso <sup>-1</sup> |      | Médias |
|---|---------------------------|------|--------|
|   | Nitrapirina               |      |        |
|   | Sem                       | Com  |        |
| Testemunha                                  | 0,67                      | 0,73 | 0,70 e |
| N 100% NO <sub>3</sub>                      | 1,10                      | 1,39 | 1,24 d |
| N 100% NH <sub>4</sub>                      | 2,46                      | 2,30 | 2,34 a |
| N 50% NO <sub>3</sub> + 50% NH <sub>4</sub> | 1,78                      | 1,74 | 1,76 b |
| N100% amídico                               | 1,52                      | 1,44 | 1,48 c |
| Médias <sup>ns</sup>                        | 1,51                      | 1,52 |        |

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade.



## 5. CONCLUSÕES

Os dados obtidos e discutidos na presente pesquisa permitem concluir que:

1. A aplicação da nitrapirina ao argissolo não afetou o rendimento de matéria seca da parte aérea das plantas de milho, independente da fonte de nitrogênio suprida às plantas. O maior rendimento de matéria seca ocorreu com o suprimento do nitrogênio na forma de nitrato de amônio (50%  $\text{NO}_3^-$  + 50%  $\text{NH}_4^+$ ).
2. A absorção de nitrogênio pelas plantas de milho foi maior na presença da nitrapirina. A nitrapirina não afetou a absorção de nitrato pelas plantas de milho enquanto que a absorção de amônio foi reduzida na presença da mesma.
3. A absorção de potássio e de cálcio pelas plantas não foi afetada pela presença da nitrapirina; a absorção do magnésio pelas plantas diminuiu na presença da nitrapirina.
4. Fósforo e enxofre não foram afetados pela nitrapirina; da mesma forma a absorção de cobre e de zinco também não foram afetadas. A absorção de manganês foi menor na presença do inibidor da nitrificação.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, A.; TUCKER, T. C.; THOMPSON, T. L. SALIM, M. Effects of Salinity and Mixed Ammonium and Nitrate Nutrition on the Growth and Nitrogen Utilization of Barley. **Journal of Agronomy and Crop Science**. Blackwells Wissenschafts - Verlag, Alemanha, v. 186, p.223-228, 2001.
- ALVES, V.M.C.; NOVAIS, R.F.; OLIVEIRA, M.F.G.; SANT'ANNA, R. Cinética e translocação de fósforo em híbridos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, p.1047-1052, 1998.
- ANDRADE, S.R.M.; SANT'ANNA, R.; MOSQUIM, P.R.; CAMBRAIA, J. Assimilação do nitrogênio pelas plantas de *Panicum maximum*, cv. Vencedor, submetidas a diferentes proporções  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ . [Goiás] : Embrapa Cerrados, 2001. p. 1-20, 2001. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 13).
- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Predicting the effect of ammonium placement on nitrogen uptake by corn. **Agronomy Journal**, Madison, USA, v.82, n. 1, p.135-138,1990
- ANGHINONI, I.; MEURER E.J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, Aracaju, SE, 1999. **Anais...** Aracaju, 1999. p.57-87.
- ATLAS, R.M.; BARTHA, R. Microbial ecology fundamentals and applications. 3ª Ed., Redwood: The Benjamin/Cummings Publishing Co., 563p, 1993.
- BABOURINA, O.; VOLTCHANSKII, K.; MACGANN, B.; NEWMAN, I.; RENGEL, Z. Nitrate supply affects ammonium transport in canola roots. **Journal of experimental botany**, Oxford, UK, v. 58, no. 3, p. 651-658, 2006.
- BAUER, G.A.; BERNTSON, G.M. Ammonium and nitrate acquisition by plants in response to elevated  $\text{CO}_2$  concentration. In: The roles of root physiology and architecture. **Tree Physiology**. Heron Publishing, Canada, v.21, p.137-144, 1999.
- BEEVERS, L.; HAGEMAN, R.H. Uptake and reduction of nitrate: bacteria and higher plants. In: ENCYCLOPEDIA of Plant Physiology. Berlin : Springer, 1983. New series vol. 15A, p.351-375

- BELOW, F.E. Physiology, nutrition, and nitrogen fertilization of corn in the United States. In: SIMPÓSIO ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, Piracicaba, 2000. **Anais**. Piracicaba, 2000. CD-ROM 2.
- BLOOM, A.J. Nitrogen as a limiting factor: Crop acquisition of ammonium and nitrate. In: JACKSON, L.E. (Ed.). **Ecology in agriculture**. San Diego, CA : Academic Press, 1997. p. 145-172
- BLOOM, A.J.; MEYERHOFF, P.A.; TAYLOR, A.R.; ROST, T.L. Root Development and Absorption of Ammonium and Nitrate from the Rhizosphere. **Journal of Plant Growth Regulation**, Springer Verlag KG, Germany, v.21, p.416-431, 2003.
- BOUKCIM, H.; PAGES, L.; PLASSARD, C.; MOUSAIN, D. Root system architecture and receptivity to mycorrhizal infection in seedlings of *Cedrus atlantica* as affected by nitrogen source and concentration. **Tree Physiology**, Heron Publishing, Canada, v.21, p.109-115, 2001
- BOWEN, J.E. Absorption of copper, zinc and manganese by sugarcane tissue. **Plant Physiology**, Rockville, MD, v.44, p.255-261, 1969.
- BRIONES, A.M. Jr.; OKABE, S.; UMEMIYA, Y.; RAMSING, N.B.; REICHARDT, W.; OKUYAMA, H. Ammonia-oxidizing bacteria on root biofilms and their possible contribution to N use efficiency of different rice cultivars. **Plant and Soil**, Kluwer Academic, Netherlands, v.250, p.335-348, 2003.
- BRITTO, D.T.; KRONZUCKER, H.J.  $\text{NH}_4^+$  toxicity in higher plants, a critical review. **Journal of Plant Physiology**, Toronto, Canada, v.159, p.567–584, 2002.
- BRITTO, D.T, SIDDIQI, M.Y, GLASS, A.D.M.; KRONZUCKER, H.J. Futile transmembrane  $\text{NH}_4^+$  cycling: a cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, USA 98, p.4255–4258, 2001.
- CANTARELLA, H. VII – Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F. et al. (Ed.) **Fertilidade do solo**. Viçosa : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470
- CHEN, W.; LUO, J-K; SHEN, Q-R. Effect of  $\text{NH}_4^+$ - N /  $\text{NO}_3^-$  - N ratios on growth and some physiological parameters of chinese cabbage cultivars. **Pedosphere**, China, vol.15, p.310-318, 2005.
- CLAUSSEN, W. e LENZ, F. Effect of ammonium or nitrate nutrition on net photosynthesis, growth, and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry, raspberry and strawberry. **Plant and Soil**, Springer, Netherlands, v.208, p.95–102, 1999.
- CRAWFORD, D.M., CHALK, P.M. Sources of N uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) and N transformations in soil treated with a nitrification inhibitor (nitrapyrin). **Plant and Soil**, Netherlands, v.149, p.59-72, 1993.

- DECHEN, A.R. ; NACHTIGALL, G.R. XIII – Micronutrientes. In: FERNANDES, M.S. (Ed.) **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.327-354.
- DOU, H.; ALVA, A.K; BONDADA, B.R.; Growth and chloroplast ultrastructure of two citrus rootstock seedlings in response to ammonium and nitrate nutrition. **Journal of Plant Nutrition**. Marcel Dekker, USA, v.22, p.1731–1744, 1999.
- DUAN, Y.H.; ZHANG, Y.L.; SHEN, Q.R.; WANG, S.W. Nitrate effect on rice growth and nitrogen absorption and assimilation at different growth stages. **Pedosphere**, China, vol.16, p.707-717, 2006.
- DUAN, Y. H.; ZHANG, Y. L.; YE, L. T.; FAN, X. R.; XU, G. H.; SHEN, Q. R. Responses of Rice Cultivars with Different Nitrogen Use Efficiency to Partial Nitrate Nutrition. **Annals of Botany**. UK, vol.99, p.1153-1160, 2007.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspective**. 2ed. Sunderland : Sinauer Associates, 2005. 400p.
- FRYE, W. Nitrification inhibition for nitrogen efficiency and environment protection. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, Frankfurt, 2005. Proceedings. Paris, **International Fertilizer Industry Association**, 2005. Sp. CD-ROM
- GERENDAS, J.; RATCLIFFE, R.G. Intracellular pH regulation in maize root tips exposed to ammonium at high external pH. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, UK, v.51, p.207–219, 2000.
- GLOSER, V.; GLOSER, J. Nitrogen and base cation uptake in seedlings of *Acer pseudoplatanus* and *Calamagrostis villosa* exposed to an acidified environment. **Developments in Plant and Soil Sciences**. Dordrecht , Netherlands, v.226, p.71-77, 2000.
- GUO, S. The effects of N form (ammonium versus nitrate) on growth, photosynthesis and water uptake of *Phaseolus vulgaris* L. Plants. PhD Thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 2001.
- GUO, S., BRUECK, H.; SATTELMACHER, B. Effects of supplied nitrogen form on growth and water uptake of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. **Plant and Soil**, Springer, Netherlands, v.239, p.267–275, 2002.
- HANWAY, J.L.; OLSON, R.A. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison : American Society of Agronomy, 1980. p.681-692.
- HAWKINS, H.J.; GEORGE, E. Reduced N-15-nitrogen transport through arbuscular mycorrhizal hyphae to *Triticum aestivum* L. supplied with ammonium vs. nitrate nutrition. **Annals of Botany**. Oxford, UK, v.87, p.303-311, 2001.

- INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION – IFA. World Fertilizer use manual. Paris, 1992, 632p.
- KIRK, G.J.D.; KRONZUCKER, H.J. The potential for nitrification and nitrate uptake in the rhizosphere of wetland plants: a modelling study. **Annals of Botany**. UK, v.96, p.639-646, 2005.
- KLEINHOF, A.; WARNER, R.L. Nitrate assimilation. In: MIFLIN, B.; LEA, P.J. (Eds.) **The biochemistry of plants**. [San Diego : Academic Press], 1990. v.16, p.89-120.
- KÖCHY, M.; WILSON, S.D. Nitrogen deposition and forest expansion in the northern Great Plains. **Journal of Ecology**. Blackwell, GB, v.89, p.807-817, 2001.
- KRONZUCKER, H.J.; SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M.; KIRK, J.D. Nitrate–ammonium synergism in rice. A subcellular flux analysis. **Plant Physiology**, Rockville, MD, v.119, p.1041–1045, 1999.
- KRONZUCKER, H.J.; GLASS, A.D.M.; SIDDIQI, M.Y.; KIRK, J.D. Comparative kinetic analysis of ammonium and nitrate acquisition by tropical lowland rice: implications for rice cultivation and yield potential. **New Phytologist**, Cambridge University Press, UK, v.145, p.471-476, 2000.
- LI, Y.L.; ZHANG, Y.L.; HU, J.; SHEN, Q.R. Contribution of nitrification happened in rhizospheric soil growing with different rice cultivars to N nutrition. **Biology and Fertility of Soils**, Springer, Berlin, v.43, p.417-425, 2006.
- MCBRIDE, M.D. **Environmental chemistry of soils**. New York : Oxford University Press, 1994. 406p.
- MCKEE, H. S. **Nitrogen metabolism in plants**. Oxford : Clarendon Press, 1962. 728 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo : Ceres, 2006. 638p.
- MAGALHÃES, J.R.; HUBER, D.M.; TSAI, C.Y. influence of the form of nitrogen on ammonium, aminoacids and N-assimilating enzyme activity in maize genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v.18, p.747-763, 1995.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. New York: Academic Press, 1995. 889p.
- MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 3ed. Porto Alegre : Evangraf, 2006. 285p.
- MEURER, E.J. XI – Potássio. In: FERNANDES, M.S. (Ed.) **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.281-298
- MOREIRA, F.M. de S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Ufla, 2002. 626p.

- MOSIER, A.; GALLOWAY, J. Setting the scene - The international nitrogen initiative. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, Frankfurt, 2005. **Proceedings**. Paris, 2005. 10p. CD-ROM.
- OLIVEIRA, L. A., KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, A.C. Acumulação de silício em arroz em diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.685-690, 2007.
- PRIMAVESI, A.C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L.A.; CANTARELLA, H.; SILVA, A.G. Absorção de cátions e ânions pelo capim-coastcross adubado com uréia e nitrato de amônio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, p.247-253, 2005.
- QIAN, X.; SHEN, Q.; XU, G.; WANG, J.; ZHOU, M. Nitrogen form effects on yield and nitrogen uptake of rice crop grown in aerobic soil. **Journal of Plant Nutrition**. Marcel Dekker, USA, v.27, p.1061-1076, 2004.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2ed. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico, 100).
- REDINBAUGH, M.G.; CAMPBELL, W.H. Glutamine-synthetase and ferredoxin-dependent glutamate synthase expression in the maize (*Zea mays*) root primary response to nitrate. Evidence for an organ-specific response. **Plant Physiology**, Rockville, MD, v.101, p.1249-1255, 1993.
- RON, M.M.; LOEWY, T. Comparative Effectiveness of Urea and Calcium Ammonium Nitrate for Wheat Fertilization in South-Western Buenos Aires (Argentina). In: Wheat Production in Stressed Environments Proceedings of the 7th International Wheat Conference, 27 November-2 December 2005, Mar del Plata, Argentina. **Developments in Plant Breeding**. Springer, Netherlands, vol.12, p.189-195, 2007
- RUAN, J; GERENDAS, J.; HARDTER, R.; SATTELMACHER, B. Effect of Nitrogen Form and Root-zone pH on Growth and Nitrogen Uptake of Tea (*Camellia sinensis*) Plants. **Annals of Botany**. Oxford, UK, v.99, p.301-310, 2007.
- SAS. **Institute Statistical Analysis System**. User's guide. 4.ed. Cary: SAS Institute, 1989. 846p.
- SHUMAN, L.M. Mineral nutrition. In: WILKINSON, R.E.(Ed.) **Plant-environment interactions**. New York : Marcel Dekker, 1994. p.149-182.
- SMICIKLAS, K.D.; BELOW, F.E. Role of nitrogen form in determining yield of field-grown maize. **Crop Science**, College Park, MD, v.32, p.1220-1225, 1992.

- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10ed. Porto Alegre, 2004. 400p.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2002. 416p.
- SOUZA, S.R.; FERNANDES, M.S. IX – Nitrogênio. In: FERNANDES, M.S. (Ed.) **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.215-252
- TAIZ, L ;ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre : Artmed, 2004. 719p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ed. Porto Alegre: UFRGS-Departamento de Solos, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).
- THOMAS, A.L.; SODEK, L. Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. **Braz. J. Plant Physiol.**, Londrina, v. 17, n. 3, p.291-297, 2005.
- TISDALE, L.; NELSON, N.L.; BEATON, J.D. ; HAVLIN, J.L. **Soil fertility and fertilizer** : An introduction to nutrient management. 7ed. New Jersey : Pearson Prentice Hall, 2005. 515p.
- TRENKEL, M.E. **Improving fertilizer use efficiency**. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. Paris : International Fertilizer Industry Association, 1997. 151p.
- VITTI, G.C.; LIMA, E.; CICARONE, F. XII – Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M.S. (Ed.) **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.299-326
- von WIREN, N.; LAUTER, F.R.; NINNEMANN, O.; GILLISEN, B.; WALCH-LIU, P.; ENGELS, C; *et al.* Differential regulation of three functional ammonium transporter genes by nitrogen in root hairs and by light in leaves of tomato. **Plant Journal**, Bios Scientific Publishers & Blackwell Scientific, GB, v.21, p.167-175, 2000.
- XU, G.;WOLF, S.; KAFKAFI, U. Effect of varying nitrogen form and concentration during growing season on sweet pepper flowering and fruit yield. **Journal of Plant Nutrition**. Marcel Dekker, USA, v.24, p.1099-1116, 2001.
- WALCH-LIU, P; NEUMANN, G.; BANGERTH, F.; ENGELS, C. Neumann G, Bangerth F, Engels C. Rapid effects of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, UK, v.51, p.227–237, 2000.

- WALCH-LIU, P.; NEUMANN, G.; ENGELS, C. Response of shoot and root growth to supply of different nitrogen form is not related to carbohydrate and nitrogen status of tobacco plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, Germany, v.164, p.97–103, 2001.
- WIESLER; F. Comparative assessment of the efficacy of various nitrogen fertilizers. **Journal of Crop Nutrition**, Athens, GE, v.1, p.81-114, 1998.
- WILKINSON, S.R; GRUNES, D.L.; SUMNER, M.E. Nutrient interaction in soil and plant nutrition. In: SUMNER, M.E.(Ed.) **Handbook of soil science**. Boca Raton : CRC Press, 2000. p.D89-D112.
- WILLIAMS, L.E.; MILLER, A.J. Transporters responsible for the uptake and partitioning of nitrogenous solutes. **Annual Review Plant Physiology, Plant Molecular Biology**, Palo Alto, CA, v.52, p.659-688, 2001
- ZHANG, X-K; RENGEL, Z. Gradients of pH and ammonium and phosphorus concentration between the banded fertilizer and wheat roots. **Australian Journal of Agricultural Research**, CSIRO Publishing, Australia, v.50, p.365–373, 1999.
- ZHANG, X-K; RENGEL, Z. Role of soil pH, Ca supply and banded P fertilisers in modulating ammonia toxicity to wheat. **Australian Journal of Agricultural Research**, Australia : CSIRO Publishing, v.51, p.691–699, 2000.
- ZHANG, X-K; RENGEL, Z. Soil solution composition in association with the toxicity of banded di-ammonium phosphate to wheat and amelioration by CaCO<sub>3</sub>. **Australian Journal of Agricultural Research**, Australia : CSIRO Publishing, v.54, p.183–191, 2003.
- ZHU, Z; GERENDAS, J.; BENDIXEN, R.; SCHINNER, K.; TABRIZI, H.; SATTELMACHER, B.; HANSEN, U-P. Different tolerance to light stress in NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - grown *Phaseolus vulgaris* L. **Plant Biology**, Stuttgart, Germany, v.2, p.558–570, 2000.



## 7. APÊNDICES

APÊNDICE 1. Matéria seca acumulada ( $\text{g vaso}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento  | Bloco I                             | Bloco II | Bloco III | Média |
|---|-------------------------------------|----------|-----------|-------|
|   | ----- g MS vaso <sup>-1</sup> ----- |          |           |       |
| Sem nitrapirina   |                                     |          |           |       |
| Testemunha sem N  | 11,49                               | 11,82    | 10,75     | 11,35 |
| N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | 15,18                               | 17,09    | 16,63     | 16,30 |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | 13,35                               | 16,53    | 15,7      | 15,19 |
| N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 20,75                               | 19,09    | 20,35     | 20,06 |
| N 100% amídico  | 16,76                               | 16,87    | 15,15     | 16,26 |
| Com nitrapirina   |                                     |          |           |       |
| Testemunha sem N  | 13,08                               | 12,64    | 10,79     | 12,17 |
| N 93% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 7% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 17,82                               | 19,68    | 17,98     | 18,49 |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | 15,28                               | 15,44    | 15,42     | 15,38 |
| N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 19,22                               | 18,44    | 20,28     | 19,31 |
| N 100% amídico  | 15,97                               | 16,88    | 13,05     | 15,30 |

APÊNDICE 2. Concentração de N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento  | Bloco I                        | Bloco II | Bloco III | Média |
|---|--------------------------------|----------|-----------|-------|
|   | ----- g kg <sup>-1</sup> ----- |          |           |       |
| Sem nitrapirina   |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N  | 7,96                           | 6,91     | 8,14      | 7,67  |
| N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | 19,16                          | 24,76    | 28,09     | 24,00 |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | 35,61                          | 28,96    | 33,69     | 32,75 |
| N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 24,59                          | 23,01    | 27,04     | 24,88 |
| N 100% amídico  | 25,64                          | 23,01    | 28,61     | 25,75 |
| Com nitrapirina   |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N  | 8,49                           | 8,84     | 8,14      | 8,49  |
| N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | 29,84                          | 26,86    | 28,61     | 28,44 |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | 28,79                          | 33,16    | 31,41     | 31,12 |
| N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 25,99                          | 31,41    | 27,74     | 28,38 |
| N 100% amídico  | 28,09                          | 30,36    | 33,69     | 30,71 |

APÊNDICE 3. Concentração de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg kg<sup>-1</sup>) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento  | Bloco I                         | Bloco II | Bloco III | Média  |
|---|---------------------------------|----------|-----------|--------|
|   | ----- mg kg <sup>-1</sup> ----- |          |           |        |
| Sem nitrapirina   |                                 |          |           |        |
| Testemunha sem N  | 22,73                           | 28,59    | 35,93     | 29,08  |
| N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | 36,66                           | 76,25    | 61,59     | 58,17  |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | 79,19                           | 56,46    | 203,10    | 112,91 |
| N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 62,32                           | 76,25    | 65,99     | 68,19  |
| N 100% amídico  | 47,66                           | 62,32    | 61,59     | 57,19  |
| Com nitrapirina   |                                 |          |           |        |
| Testemunha sem N  | 0,00                            | 15,40    | 27,86     | 14,42  |
| N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | 41,06                           | 57,92    | 85,78     | 61,59  |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | 74,79                           | 68,19    | 134,18    | 92,38  |
| N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 53,52                           | 41,06    | 72,59     | 55,72  |
| N 100% amídico  | 56,46                           | 98,25    | 32,99     | 62,57  |

APÊNDICE 4. Concentração de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg kg<sup>-1</sup>) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento  | Bloco I                         | Bloco II | Bloco III | Média   |
|---|---------------------------------|----------|-----------|---------|
|   | ----- mg kg <sup>-1</sup> ----- |          |           |         |
| Sem nitrapirina   |                                 |          |           |         |
| Testemunha sem N  | 36,66                           | 47,66    | 24,93     | 36,42   |
| N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | 125,38                          | 153,97   | 205,30    | 161,55  |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | 2362,37                         | 1438,54  | 1585,91   | 1795,61 |
| N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 204,56                          | 168,64   | 181,10    | 184,77  |
| N 100% amídico  | 146,64                          | 141,51   | 234,62    | 174,26  |
| Com nitrapirina   |                                 |          |           |         |
| Testemunha sem N  | 15,40                           | 29,33    | 13,20     | 19,31   |
| N 100% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                   | 255,89                          | 203,10   | 219,23    | 226,07  |
| N 100% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                                   | 1099,80                         | 1456,14  | 1161,39   | 1239,11 |
| N 50% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 50% NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 126,11                          | 86,52    | 84,32     | 98,98   |
| N 100% amídico  | 94,58                           | 19,80    | 5,13      | 39,84   |

APÊNDICE 5. Concentração de P ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento                                  | Bloco I                        | Bloco II | Bloco III | Média |
|---|--------------------------------|----------|-----------|-------|
|   | ----- $\text{g kg}^{-1}$ ----- |          |           |       |
| Sem nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 4,33                           | 4,25     | 4,62      | 4,40  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 3,25                           | 3,32     | 3,24      | 3,27  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 7,02                           | 6,42     | 6,98      | 6,81  |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 3,93                           | 4,04     | 4,43      | 4,13  |
| N 100% amídico                              | 4,99                           | 4,22     | 5,75      | 4,99  |
| Com nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 5,22                           | 4,89     | 4,88      | 5,00  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 3,51                           | 3,46     | 3,35      | 3,44  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 6,65                           | 7,55     | 7,06      | 7,09  |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 4,49                           | 4,97     | 4,88      | 4,78  |
| N 100% amídico                              | 5,41                           | 5,22     | 5,77      | 5,46  |

APÊNDICE 6. Concentração de K ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento                                  | Bloco I                        | Bloco II | Bloco III | Média |
|---|--------------------------------|----------|-----------|-------|
|   | ----- $\text{g kg}^{-1}$ ----- |          |           |       |
| Sem nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 27,01                          | 25,39    | 29,17     | 27,19 |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 24,85                          | 24,31    | 24,85     | 24,67 |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 27,55                          | 24,85    | 29,17     | 27,19 |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 19,99                          | 20,53    | 21,61     | 20,71 |
| N 100% amídico                              | 24,85                          | 18,37    | 26,47     | 23,23 |
| Com nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 30,25                          | 28,63    | 31,33     | 30,07 |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 24,85                          | 22,69    | 23,77     | 23,77 |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 26,47                          | 24,31    | 25,93     | 25,57 |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 21,61                          | 23,23    | 22,15     | 22,33 |
| N 100% amídico                              | 23,23                          | 21,07    | 27,55     | 23,95 |

APÊNDICE 7. Concentração de Ca ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento                                  | Bloco I                        | Bloco II | Bloco III | Média |
|---|--------------------------------|----------|-----------|-------|
|   | ----- $\text{g kg}^{-1}$ ----- |          |           |       |
| Sem nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 2,32                           | 2,24     | 2,66      | 2,41  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 4,11                           | 7,34     | 7,26      | 6,24  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 6,12                           | 5,51     | 6,05      | 5,89  |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 3,80                           | 4,11     | 4,11      | 4,01  |
| N 100% amídico                              | 3,76                           | 2,70     | 3,50      | 3,32  |
| Com nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 2,36                           | 2,51     | 2,24      | 2,37  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 7,26                           | 5,93     | 6,73      | 6,64  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 5,36                           | 5,93     | 5,89      | 5,73  |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 4,22                           | 4,64     | 4,07      | 4,31  |
| N 100% amídico                              | 3,31                           | 3,27     | 3,95      | 3,51  |

APÊNDICE 8. Concentração de Mg ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento                                  | Bloco I                        | Bloco II | Bloco III | Média |
|---|--------------------------------|----------|-----------|-------|
|   | ----- $\text{g kg}^{-1}$ ----- |          |           |       |
| Sem nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 2,05                           | 1,94     | 2,06      | 2,01  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 3,21                           | 3,56     | 3,49      | 3,42  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 4,63                           | 4,83     | 4,96      | 4,81  |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 3,39                           | 3,95     | 3,86      | 3,73  |
| N 100% amídico                              | 4,07                           | 2,95     | 4,10      | 3,71  |
| Com nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 1,99                           | 1,98     | 1,88      | 1,95  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 3,92                           | 3,75     | 3,59      | 3,75  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 4,08                           | 4,05     | 4,63      | 4,25  |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 3,76                           | 3,69     | 3,62      | 3,69  |
| N 100% amídico                              | 3,53                           | 3,20     | 4,01      | 3,58  |

APÊNDICE 9. Concentração de S ( $\text{g kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento                                  | Bloco I                        | Bloco II | Bloco III | Média |
|---|--------------------------------|----------|-----------|-------|
|   | ----- $\text{g kg}^{-1}$ ----- |          |           |       |
| Sem nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 2,63                           | 2,43     | 2,35      | 2,47  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 1,83                           | 1,82     | 1,93      | 1,86  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 1,93                           | 1,98     | 2,48      | 2,13  |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 2,46                           | 2,08     | 1,98      | 2,17  |
| N 100% amídico                              | 2,22                           | 0,88     | 2,67      | 1,93  |
| Com nitrapirina                             |                                |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 2,90                           | 2,34     | 2,75      | 2,67  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 2,44                           | 1,99     | 1,84      | 2,09  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 1,84                           | 1,79     | 1,94      | 1,86  |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 2,38                           | 2,00     | 2,28      | 2,22  |
| N 100% amídico                              | 2,26                           | 2,42     | 2,74      | 2,47  |

APÊNDICE 10. Concentração de Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento                                  | Bloco I                         | Bloco II | Bloco III | Média |
|---|---------------------------------|----------|-----------|-------|
|   | ----- $\text{mg kg}^{-1}$ ----- |          |           |       |
| Sem nitrapirina                             |                                 |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 8,19                            | 7,60     | 10,53     | 8,77  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 11,11                           | 11,70    | 11,11     | 11,31 |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 16,96                           | 15,20    | 16,96     | 16,37 |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 12,28                           | 13,45    | 12,28     | 12,67 |
| N 100% amídico                              | 13,45                           | 14,04    | 13,45     | 13,65 |
| Com nitrapirina                             |                                 |          |           |       |
| Testemunha sem N                            | 9,94                            | 10,53    | 8,77      | 9,75  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 14,62                           | 11,11    | 14,04     | 13,26 |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 16,37                           | 14,04    | 14,62     | 15,01 |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 18,13                           | 15,20    | 11,11     | 14,81 |
| N 100% amídico                              | 12,87                           | 11,11    | 12,28     | 12,09 |

APÊNDICE 11. Concentração de Mn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento                                  | Bloco I                         | Bloco II | Bloco III | Média  |
|---|---------------------------------|----------|-----------|--------|
|   | ----- $\text{mg kg}^{-1}$ ----- |          |           |        |
| Sem nitrapirina                             |                                 |          |           |        |
| Testemunha sem N                            | 81,72                           | 79,48    | 81,72     | 80,97  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 71,64                           | 76,12    | 77,24     | 75,00  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 627,99                          | 636,94   | 605,60    | 623,51 |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 202,61                          | 213,81   | 200,37    | 205,60 |
| N 100% amídico                              | 394,03                          | 425,37   | 430,97    | 416,79 |
| Com nitrapirina                             |                                 |          |           |        |
| Testemunha sem N                            | 82,84                           | 81,72    | 79,48     | 81,34  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 70,52                           | 63,81    | 72,76     | 69,03  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 573,13                          | 582,09   | 596,64    | 583,96 |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 195,90                          | 222,76   | 204,85    | 207,84 |
| N 100% amídico                              | 332,46                          | 296,64   | 306,72    | 311,94 |

APÊNDICE 12. Concentração de Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Tratamento                                  | Bloco I                         | Bloco II | Bloco III | Média  |
|---|---------------------------------|----------|-----------|--------|
|   | ----- $\text{mg kg}^{-1}$ ----- |          |           |        |
| Sem nitrapirina                             |                                 |          |           |        |
| Testemunha sem N                            | 57,27                           | 62,20    | 58,03     | 59,17  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 63,72                           | 70,54    | 67,89     | 67,38  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 160,37                          | 168,60   | 156,26    | 161,74 |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 83,44                           | 87,23    | 95,95     | 88,87  |
| N 100% amídico                              | 90,64                           | 95,95    | 94,82     | 93,81  |
| Com nitrapirina                             |                                 |          |           |        |
| Testemunha sem N                            | 62,58                           | 54,99    | 62,96     | 60,18  |
| N 100% $\text{NO}_3^-$                      | 69,79                           | 64,48    | 91,78     | 75,35  |
| N 100% $\text{NH}_4^+$                      | 148,04                          | 135,70   | 164,49    | 149,41 |
| N 50% $\text{NO}_3^-$ + 50% $\text{NH}_4^+$ | 91,40                           | 94,82    | 84,20     | 90,14  |
| N 100% amídico                              | 78,51                           | 79,65    | 131,59    | 96,58  |

APÊNDICE 13. Valores de F Tratamento (F Trat.) e coeficiente de variação (CV) da análise de variância dos resultados de matéria seca da parte aérea e teores de nutrientes em tecido de milho cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, por 30 dias em casa-de-vegetação, em função de diferentes fontes de N sem e com nitrapirina

| Variável  | Valores de F Tratamento |            |           | C.V.<br>% |
|---|-------------------------|------------|-----------|-----------|
|   | Nitrapirina             | Fonte de N | Interação |           |
| Matéria seca da parte aérea                           | 0,50 ns                 | 38,31 *    | 1,84 ns   | 7,23      |
| N total acumulado na parte aérea                      | 11,44 *                 | 131,71 *   | 3,25 *    | 9,25      |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> acumulado na parte aérea | 0,28 ns                 | 5,28 *     | 0,25 ns   | 51,40     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> acumulado na parte aérea | 10,47 *                 | 173,95 *   | 5,91 *    | 27,98     |
| P acumulado na parte aérea                            | 11,99 *                 | 69,99 *    | 0,48 ns   | 7,96      |
| K acumulado na parte aérea                            | 2,49 ns                 | 11,56 *    | 2,24 ns   | 6,83      |
| Ca acumulado na parte aérea                           | 0,98 ns                 | 42,87 *    | 0,74 ns   | 16,79     |
| Mg acumulado na parte aérea                           | 0,06 ns                 | 67,91 *    | 3,10 *    | 10,33     |
| S acumulado na parte aérea                            | 1,67 ns                 | 4,36 *     | 1,03 ns   | 17,98     |
| Cu acumulado na parte aérea                           | 2,10 ns                 | 49,94 *    | 5,11 *    | 10,10     |
| Mn acumulado na parte aérea                           | 10,31 *                 | 394,19 *   | 6,33 *    | 9,94      |
| Zn acumulado na parte aérea                           | 0,03 ns                 | 93,95 *    | 1,85 ns   | 10,37     |

\* - significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

ns - significativo ao nível de 5 % de probabilidade.