



DISSERTAÇÃO

**INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO EM
FERTILIZANTES NITROGENADOS E
RENDIMENTO DE MILHO**

RAFAEL MARCELINO

**Campinas, SP
2009**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

INSTITUTO AGRONÔMICO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA
TROPICAL E SUBTROPICAL

INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO EM FERTILIZANTES
NITROGENADOS E RENDIMENTO DE MILHO

RAFAEL MARCELINO

Orientador: Heitor Cantarella

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre** em Agricultura Tropical e Subtropical Área de Concentração em Gestão de Recursos Agroambientais

Campinas, SP
Abril 2009

Ficha elaborada pela bibliotecária do Núcleo de Informação e Documentação do Instituto Agrônomo

M314i Marcelino, Rafael
Inibidor de nitrificação em fertilizantes nitrogenados e rendimento de milho./Rafael Marcelino. Campinas, 2009. 81 fls.

Orientador: Heitor Cantarella
Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) –
Instituto Agrônomo

1. Milho - dicianodiamida (DCD), 2. Milho – inibidor de nitrificação DCD
3. Milho – adubação nitrogenada I. Cantarella, Heitor II.Título

CDD. 633.15



SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO
AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA
DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO AGRONÔMICO
Pós-Graduação
Av. Barão de Itapura 1481 Caixa Postal 28
13001-970 Campinas, SP - Brasil
(019) 3231-5422 ramal 194
pgiac@iac.sp.gov.br



Curso de Pós-Graduação
Agricultura Tropical e Subtropical
Certificado de Aprovação

Título: Inibidor de nitrificação em fertilizantes nitrogenados e rendimento de milho

Aluno: Rafael Marcelino

Área de Concentração: Gestão de Recursos Agroambientais

Processo SAA nº: 12194/07

Orientador: Dr. Heltor Cantarella

Aprovado pela Banca Examinadora:

Dr. Heltor Cantarella - IAC

Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol - UNESP

Dr. José Antônio Quaggio - IAC

Campinas, 13 de abril de 2009

Visto:

Adriana Parada Dias da Silveira
Coordenadora
Pós-Graduação Instituto Agronômico

Aos meus pais

Maria Cândida e Luiz,

DEDICO

À minha namorada

Milena,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, o Pesquisador Científico Dr. Heitor Cantarella, pela convivência diária e por toda orientação, confiança, paciência, oportunidades, incentivos e conselhos que me foram dados durante o curso de pós-graduação;
- Aos companheiros de trabalho na CATI, onde nas duas regionais que trabalhei – Avaré e Botucatu - me apoiaram no que foi necessário nessa dura fase, que coincidiu o fim do mestrado com o começo do trabalho. Na pessoa dos diretores, Antônio Rangel em Avaré, e Alfredo Chaguri Júnior em Botucatu, agradeço à todos vocês;
- À minha família, especialmente os meus pais – Luiz Antonio Augusto Marcelino e Maria Cândida Sacco Marcelino - que sempre me apoiaram e proporcionaram a estrutura necessária para que o melhor fosse feito;
- Aos pesquisadores Aildson P. Duarte, Waldo A. R. Lara Cabezas, Rogério S. de Freitas e Sandro R. Brancalião, além dos funcionários dos pólos regionais de Assis e Votuporanga, que ajudaram na condução dos experimentos de campo;
- Aos funcionários (Zé Luiz, Nogueira, Maria Helena, Marilda, Edilberto, Tibana, Rubens, Giselda, Luis, Renata, Alexandre) e pesquisadores (Cristiano, Fernando, Rodrigo, Estevão, Teixeira, Raij, Quaggio, Mônica, Cleide) da Fertilidade do Solo, pelo convívio e ajuda no período;
- Aos colegas da pós-graduação, pelo companheirismo ao longo do curso;
- Ao Lucas Amaral e Johnny Soares (estagiários) e Gustavo Becari (mestrando), que ajudaram na execução do trabalho;
- Aos pesquisadores de outros Centros / Instituições que me ajudaram de alguma forma: Leonardo T. Bull, Carlos A. C. Crusciol, Juliano Corrêa, Marco Tecchio, Claudinei Lima, Tammy Kiihl, Roberto L. V. Boas, Elisa Freitag, Clarice Backes;
- Aos meus amigos Rômulo Augusto Ramos e Alexandre de Souza Ramos que me abrigaram em Campinas e conviveram comigo durante o curso;
- À todos os meus amigos, em especial aos da República Santa Cerva de Botucatu, que mesmo de longe, estiveram presentes nos melhores momentos;
- À minha namorada, Milena C. M. Picka, que esteve sempre comigo, agüentando todos os momentos bons e ruins nessa fase, e me apoiou no que foi preciso.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	vi
INDICE DE TABELAS.....	vii
INDICE DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ANEXOS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	03
2.1 Importância do milho.....	03
2.2 Nitrogênio e nitrificao.....	03
2.3 Estratégias para aumentar a eficiência de uso de N.....	07
2.4 Inibidores de nitrificao.....	08
2.5 Adubao nitrogenada no milho em sistema plantio direto no Brasil.....	16
2.6 Uso do isótopo ¹⁵ N.....	19
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 Eficiência de DCD como inibidor de nitrificao quando associado  uréia...	22
3.2 Resposta do milho e eficiência de uso do N do fertilizante em funo da aplicao de uréia tratada com DCD.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1 Eficiência de DCD como inibidor de nitrificao quando associado  uréia...	36
4.2 Resposta do milho e eficiência de uso do N do fertilizante em funo da aplicao de uréia tratada com DCD.....	43
4.2.1 N no solo.....	43
4.2.2 N foliar.....	49
4.2.3 Rendimento de grãos.....	54
4.2.4 Interao (N no solo x N foliar x Rendimento de grãos).....	59
5 CONCLUSOES.....	69
6 REFERÊNCIAS.....	70
7 ANEXOS.....	80

LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SÍMBOLOS

N: Nitrogênio

NH₄⁺: Amônio

NO₃⁻: Nitrato

NO₂⁻: Nitrito

NH₃: Amônia

UR: Uréia

DCD: Dicianodiamida

S: Semeadura

4F: 4 folhas completamente desenvolvidas na cultura do milho

8F: 8 folhas completamente desenvolvidas na cultura do milho

12F: 12 folhas completamente desenvolvidas na cultura do milho

FL: Florescimento

C: Colheita

SPD: Sistema Plantio Direto

DMPP: 3,4-dimetilpirazole-fosfato

NI: Nitrapirina

NBPT: Tiofosfato de N-n butiltriamida

%IN: ndice de inibição da nitrificação

AMO: Amônia monoxigenase

HAO: Hidroxalamina oxidoreductase

EUA: Estados Unidos da América

DAE: Dias após a emergência

DAS: Dias após a semeadura

BNI: Inibidores biológicos de nitrificação

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 -	Caracterização química inicial do solo utilizado para experimentação em laboratório.....	23
Tabela 2 -	Caracterização física inicial do solo utilizado para experimentação em laboratório.....	23
Tabela 3 -	Descrição dos tratamentos empregados no experimento em laboratório.....	24
Tabela 4 -	Caracterização química inicial do solo utilizado para experimentação em Assis (SP).....	27
Tabela 5 -	Caracterização física inicial do solo utilizado para experimentação em Assis (SP).....	27
Tabela 6 -	Caracterização química inicial do solo utilizado para experimentação em Votuporanga (SP).....	28
Tabela 7 -	Caracterização física inicial do solo utilizado para experimentação em Votuporanga (SP).....	28
Tabela 8 -	Relação dos tratamentos empregados nos experimentos de Assis (SP) e de Votuporanga (SP).....	30
Tabela 9 -	Quantidade total de N-inorgânico recuperada do fertilizante, porcentagem de N - NH_4^+ e porcentagem de inibição da nitrificação dentro de cada época, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg^{-1} solo), UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg^{-1} solo). Médias das quantidades de N recuperadas comparadas pelo teste T (LSD).....	39
Tabela 10 -	Teores de N- NH_4^+ e N- NO_3^- ao longo do perfil do solo e quantidade total de N-inorgânico encontrada no solo amostrado na época do florescimento do milho no experimento de Assis (SP). Médias dos contrastes pré-definidos comparadas pelo teste F.....	44
Tabela 11 -	Teores de N- NH_4^+ e N- NO_3^- ao longo do perfil do solo e quantidade total de N-inorgânico encontrada no solo amostrado na época em que o milho apresentava 12 folhas no experimento de Votuporanga (SP). Médias dos contrastes pré-definidos comparadas pelo teste F.....	46

Tabela 12 -	Teores de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ ao longo do perfil do solo e quantidade total de N-inorgânico encontrada no solo amostrado na época do florescimento no experimento de Votuporanga (SP). Médias dos contrastes pré-definidos comparadas pelo teste F.....	48
Tabela 13 -	Teor de nitrogênio nas folhas de milho amostradas na época do florescimento, em função das épocas de aplicação, doses de N e uso de DCD na cultura do milho – Votuporanga (SP).....	50
Tabela 14 -	Análise estatística das médias de N foliar por meio do Teste F e contrastes pré-definidos – Votuporanga (SP).....	50
Tabela 15 -	Porcentagem de átomos de ^{15}N (at ^{15}N) e porcentagem de N absorvido pelas plantas derivada dos fertilizantes (NPF) nas folhas de milho amostradas na época do florescimento – Votuporanga (SP).....	51
Tabela 16 -	Teor de nitrogênio nas folhas de milho amostradas na época do florescimento, em função das épocas de aplicação, doses de N e uso de DCD na cultura do milho – Assis (SP).....	52
Tabela 17 -	Análise estatística das médias de N foliar por meio do Teste F e contrastes pré-definidos – Assis (SP).....	52
Tabela 18 -	Rendimento de grãos de milho na colheita, em função das épocas de aplicação, doses de N e uso de DCD na cultura do milho – Votuporanga (SP).....	55
Tabela 19 -	Análise estatística das médias de rendimento de grãos por meio do Teste F e contrastes pré-definidos – Votuporanga (SP).....	55
Tabela 20 -	Quantidade de N absorvida pelas plantas (QNP), quantidade de N absorvida pelas plantas derivada dos fertilizantes (QNPF), porcentagem de N absorvida pelas plantas derivada dos fertilizantes (NPF) e porcentagem de recuperação do fertilizante aplicado (RF), na parte aérea das plantas na época da colheita – Votuporanga (SP).....	56
Tabela 21 -	Porcentagem de átomos de ^{15}N (at ^{15}N) e porcentagem de N absorvida pelas plantas derivada dos fertilizantes (NPF) nos quatro compartimentos da planta (colmo, folha, grão e sabugo) na época da colheita – Votuporanga (SP).....	56
Tabela 22 -	Quantidade de N absorvida pelas plantas (QNP) e quantidade de N absorvida pelas plantas derivada dos fertilizantes (QNPF) nos quatro compartimentos da planta (colmo, folha, grão e sabugo) na época da colheita – Votuporanga (SP).....	56

Tabela 23 -	Rendimento de grãos de milho na colheita, em função das épocas de aplicação, doses de N e uso de DCD na cultura do milho – Assis (SP).....	57
Tabela 24 -	Análise estatística das médias de rendimento de grãos por meio do Teste F e contrastes pré-definidos – Assis (SP).....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 - Caracterização climática de Assis (SP) entre meses de outubro de 2007 e março de 2008: **(a)** Precipitação pluvial e temperatura média diárias (com as somatórias parciais de precipitação pluvial evidenciadas entre as linhas pontilhadas) e representação dos estádios fenológicos do milho em que foram realizadas adubações e amostragens (S = Semeadura [23/10], 4F = 4 Folhas [09/11], 8F = 8 Folhas [23/11], FL = Florescimento [09/01], C = Colheita [13/03]); **(b)** Extrato do balanço hídrico climatológico decendial, onde valores positivos indicam excedente hídrico e negativos deficiência hídrica, considerando-se a capacidade de água disponível de 100 mm e **(c)** Variação decendial do armazenamento de água no solo. Dados obtidos a partir de estação meteorológica (CIIAGRO/IAC) localizada próxima ao campo experimental..... 34
- Figura 2 - Caracterização climática de Votuporanga (SP) entre meses de dezembro de 2007 e abril de 2008: **(a)** Precipitação pluvial e temperatura média diárias (com as somatórias parciais de precipitação pluvial evidenciadas entre as linhas pontilhadas) e representação dos estádios fenológicos do milho em que foram realizadas adubações e amostragens (S = Semeadura [13/12], 4F = 4 Folhas [27/12], 8F = 8 Folhas [11/01], 12F = 12 Folhas [25/01], FL = Florescimento [12/02], C = Colheita [08/04]); **(b)** Extrato do balanço hídrico climatológico decendial, onde valores positivos indicam excedente hídrico e negativos deficiência hídrica, considerando-se a capacidade de água disponível de 100 mm e **(c)** Variação decendial do armazenamento de água no solo. Dados obtidos a partir de estação meteorológica (CIIAGRO/IAC) localizada próxima ao campo experimental..... 35
- Figura 3 - Concentrações de NH_4^+ no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg^{-1} solo), UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg^{-1} solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias..... 36
- Figura 4 - Concentrações de NO_3^- no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg^{-1} solo), UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg^{-1} solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias..... 36

Figura 5 -	Concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg^{-1} solo), UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg^{-1} solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias.....	37
Figura 6 -	Valores de pH no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg^{-1} solo), UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg^{-1} solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias.....	38
Figura 7 -	Concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 18 mg DCD kg^{-1} solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias.....	41
Figura 8 -	Teor de nitrogênio nas folhas de milho na época do florescimento, em função das épocas de aplicação, doses de N-uréia e uso de DCD na cultura do milho. Na regressão, as doses de N incluem os 30 kg ha^{-1} , comuns a todas as parcelas – Votuporanga (SP). S; 4F; 4F+8F: épocas de aplicação do N na Semeadura, com 4 Folhas e com 4 Folhas + 8 Folhas expandidas, respectivamente.....	53
Figura 9 -	Teor de nitrogênio nas folhas de milho na época do florescimento, em função das épocas de aplicação, doses de N-uréia e uso de DCD na cultura do milho. Na regressão, as doses de N incluem os 30 kg ha^{-1} , comuns a todas as parcelas – Assis (SP). S; 4F; 4F+8F: épocas de aplicação do N na Semeadura, com 4 Folhas e com 4 Folhas + 8 Folhas expandidas, respectivamente.....	53
Figura 10 -	Rendimento de grãos de milho na colheita, em função das épocas de aplicação, doses de N-uréia e uso de DCD na cultura do milho. Na regressão, as doses de N incluem os 30 kg ha^{-1} , comuns a todas as parcelas – Votuporanga (SP). S; 4F; 4F+8F: épocas de aplicação do N na Semeadura, com 4 Folhas e com 4 Folhas + 8 Folhas expandidas, respectivamente.....	58
Figura 11 -	Rendimento de grãos de milho na colheita, em função das épocas de aplicação, doses de N-uréia e uso de DCD na cultura do milho. Na regressão, as doses de N incluem os 30 kg ha^{-1} , comuns a todas as parcelas – Assis (SP). S; 4F; 4F+8F: épocas de aplicação do N na Semeadura, com 4 Folhas e com 4 Folhas + 8 Folhas expandidas, respectivamente.....	58

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 -	Teores de nutrientes nas folhas de milho no florescimento – Assis (SP). Médias dos contrastes comparadas pelo teste F.....	80
Anexo 2 -	Teores de nutrientes nas folhas de milho no florescimento – Votuporanga (SP). Médias dos contrastes comparadas pelo teste F.....	81

MARCELINO, Rafael. **Inibidor de nitrificação em fertilizantes nitrogenados e rendimento de milho**. 2009. 81f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) – Pós-Graduação – IAC.

RESUMO

O uso de inibidores de nitrificação, como a dicianodiamida (DCD) pode ajudar a maximizar a eficiência de adubação nitrogenada de culturas como o milho, que recebem altas doses de N em épocas chuvosas, e podem ter parte do N aplicado lixiviado. Esse trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência de DCD como inibidor de nitrificação em condições brasileiras, além de verificar se o seu uso na adubação nitrogenada de milho aumenta a eficiência de uso do N do fertilizante e promove vantagens agronômicas para a cultura. Foram instalados três experimentos: um em laboratório, onde foi avaliada a eficiência de DCD (solo incubado com uréia tratada com diferentes doses de DCD), e dois em campo (Assis –SP e Votuporanga – SP), onde foi avaliada a resposta do milho à adição de DCD na uréia (aplicada em diferentes doses e épocas). No experimento de Votuporanga foram instaladas microparcelas com uréia marcada com ^{15}N . Os resultados de cada variável foram analisados estatisticamente por meio de testes específicos, usando o programa Sisvar 5.0. Em laboratório, o uso de DCD fez com que o NH_4^+ se mantivesse por mais tempo no solo e retardou a formação de NO_3^- ; aos 45 dias de incubação o tratamento com uréia apresentava 9% de N como NH_4^+ enquanto no tratamento com a máxima dose de DCD esse valor era de 50%. Aos 15 dias de incubação, foi possível verificar a maior efetividade de DCD; o tratamento com uréia teve uma alta taxa de nitrificação, e os tratamentos com DCD retardaram a oxidação do amônio a nitrato em até 76%. O tratamento com a máxima dose de DCD foi o que apresentou os melhores resultados, apresentando aos 30 dias uma inibição de 53% em relação ao nitrato formado no tratamento com uréia sem DCD. Nos dois experimentos de campo houve resposta a N para rendimento de grãos, que variou de 3.383 a 9.127 kg ha^{-1} . Em Votuporanga os rendimentos de grãos e teores de N foliar foram maiores nas aplicações em cobertura. A cobertura parcelada em 4 folhas + 8 folhas em comparação com os tratamentos onde toda a dose foi aplicada na semeadura aumentou em 1,9 g kg^{-1} o teor de N foliar e 1.011 kg ha^{-1} o rendimento de grãos. Não houve resposta ao uso de DCD para essas variáveis, no entanto, a DCD aumentou a recuperação de N do fertilizante pelas plantas (34,7 para 49,2%). Em Assis, houve efeito da época de aplicação para N foliar (tratamentos em cobertura proporcionaram aumento de 2,1 g kg^{-1}

¹ no teor de N foliar em relação aos tratamentos na semeadura), mas não para rendimento de grãos. As condições não foram favoráveis ao inibidor de nitrificação, que não proporcionou incrementos nas variáveis analisadas. No estudo de laboratório ficou evidenciado que a DCD foi efetiva em inibir a nitrificação. No campo, o inibidor aumentou a eficiência de uso do N da uréia pelas plantas de milho. Apesar disso, seu uso não trouxe incrementos de produção quando o N não foi um fator limitante.

Palavras-Chave: dicianodiamida (DCD), uréia, ¹⁵N.

MARCELINO, Rafael. **Nitrification inhibitor on nitrogen fertilizers and maize yield.** 2009. 81p. Dissertation (Master in Agro-environmental Resources Management) – Post-Graduation – IAC.

ABSTRACT

The use of nitrification inhibitors such as dicyandiamide (DCD) may help to maximize the efficiency of nitrogen fertilization of crops such as maize, which receive high rates of N and is grown in rainy seasons so that part of the N applied may be leached. This study aimed to evaluate the effectiveness of DCD as a nitrification inhibitor under Brazilian conditions. Three experiments were set up: one under controlled conditions in the laboratory to measure the period of nitrification inhibition of a soil incubated with urea treated with different rates of DCD, and two in the field (Votuporanga-SP and Assis-SP), in order to evaluate the response of maize to time and rate of application of N fertilizers containing DCD. In the experiment of Votuporanga microplots were added with urea labeled with ^{15}N . The results were analyzed statistically by means of specific tests, using the program SISVAR 5.0. In the laboratory, the use of DCD significantly delayed nitrification. After 45 days of incubation, the treatment with urea showed 9% of N as NH_4^+ whereas the corresponding figure for DCD was 50%. The treatment with DCD delayed the oxidation of ammonium to nitrate by up to 76% and 53% after 15 and 30 days of incubation, respectively. In two field experiments high response of grain yield to N were observed with yields ranging from 3383 to 9127 kg ha $^{-1}$. In Votuporanga sidedressing N at the 4 and 8 leaf stages increased both grain yields (+1011 kg ha $^{-1}$) and leaf N content (+1.9 g kg $^{-1}$). There was no response to the use of DCD for these variables; however, DCD increased plant recovery of fertilizer N from 34.7 to 49.2%, as evaluated with ^{15}N labeled fertilizers. In Assis, sidedressing N at the 4+8 leaf stages increased leaf N content by 2.1 g kg $^{-1}$ compared with N application at planting, but did not affect grain yield. The conditions were not favorable for the nitrification inhibitor which caused no effect on yield or leaf N concentrations. The laboratory study showed that DCD was effective to inhibit nitrification. In the field, the inhibitor increased the efficiency of use of urea N by maize plants but did not increase yield probably because leaching losses were not significant to limit N nutrition of the crop.

Key Words: dicyandiamide (DCD), urea, ^{15}N .

1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio geralmente é o nutriente exigido em maior quantidade pelas plantas, sendo integrante de todos os seus aminoácidos e ácidos nucléicos além de vários outros compostos (EPSTEIN & BLOOM, 2006). Sua absorção pelas plantas proporciona grandes incrementos no crescimento vegetativo, com folhas verdes intensas. Ele ainda atua como regulador de diversos processos do metabolismo vegetal, possuindo considerável influência na utilização de potássio (K) e fósforo (P). Nos cereais o N aumenta o enchimento de grãos e o teor de proteínas (BUCKMAN & BRADY, 1969).

No solo, a quantidade de nitrogênio na forma prontamente assimilável pelas plantas é baixa. O teor do elemento nas rochas e minerais que originaram os solos é muito pequeno e quase todo o nitrogênio do solo é proveniente dos processos de fixação a partir do nitrogênio elementar (N_2) da atmosfera terrestre. A maior parte do N (97-98%) está na forma orgânica, que é indisponível para as plantas. As plantas geralmente absorvem o N nas formas mineralizadas de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), que correspondem de 2 a 3% do nitrogênio total do solo (LOPES, 1989).

Além disso, o nitrogênio é um elemento que apresenta uma dinâmica complexa, traduzida por grande mobilidade no solo e por diversas transformações em reações químicas e biológicas, sendo passível de perdas no sistema (FURTINI NETO et al., 2001).

No ano agrícola de 2004/2005, o consumo mundial de fertilizantes nitrogenados representou cerca de 58% do total de fertilizantes contendo macronutrientes (IFA, 2008). No Brasil, o consumo de fertilizantes nitrogenados em relação aos demais fertilizantes é relativamente menor do que em países que apresentam agricultura tecnificada para a obtenção de altas produtividades e pode-se concluir que a subutilização do N é um dos fatores mais limitantes para o aumento da produtividade de muitas culturas (LOPES & GUILHERME, 2007).

Dentre as reações do nitrogênio no solo, a nitrificação é importante, uma vez que o NO_3^- , produto final da reação, é passível de ser perdido para as águas subterrâneas e superficiais através da lixiviação e para a atmosfera através do processo de desnitrificação (PIERZYNSKI et al., 2000), resultando em problemas econômicos e ambientais (FRYE, 2005).

Inibidores de nitrificação têm sido empregados para retardar a nitrificação e minimizar os possíveis impactos negativos decorrentes do excesso de nitrato no solo. Os inibidores têm por objetivo retardar a formação de NO_3^- no solo mediante interferência na atividade das bactérias do gênero *Nitrosomonas*, responsáveis pela oxidação do NH_4^+ a nitrito (NO_2^-), que corresponde à primeira fase da nitrificação (TRENKEL, 1997).

Existem vários compostos patenteados como inibidores de nitrificação, porém poucos demonstraram eficiência agrônômica e econômica simultaneamente. Até pouco tempo, os dois principais inibidores comercializados eram a nitrapirina e a dicianodiamida (DCD). Recentemente foi desenvolvido um novo inibidor de nitrificação na Alemanha – 3,4-dimetilpirazole-fosfato (DMPP) – que também tem se mostrado eficiente (FRYE, 2005).

Provavelmente DCD não é o composto mais efetivo em inibir a nitrificação, porém possui vantagens que justificam o seu uso. Estas vantagens incluem o menor custo de produção, menor suscetibilidade à volatilização, adequação para uso em conjunto com fertilizantes sólidos e ser um fertilizante solúvel de liberação lenta, contendo pelo menos 65% de N e que, após algumas semanas, se decompõe totalmente em NH_4^+ e CO_2 (FRYE, 2005; MCCARTY & BREMNER, 1989). O uso de DCD ainda não é difundido no Brasil, mas recentemente tem havido interesse por este composto por parte das empresas de fertilizantes.

Portanto, há necessidade de se estudar o uso de inibidores de nitrificação como parte das estratégias de adubação nitrogenada para aumentar a eficiência de uso do N e minimizar problemas ambientais e econômicos. Assim, os objetivos desse trabalho foram:

- (a) Avaliar a extensão do efeito de DCD associado à uréia como inibidor de nitrificação em solo brasileiro sob condições controladas;
- (b) Avaliar o efeito de DCD adicionado à uréia sobre a eficiência de uso do N e o rendimento de grãos de milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância do milho

O milho (*Zea mays* L.) em função de seu potencial produtivo, composição química e valor nutritivo, constitui-se em um dos mais importantes cereais cultivados e consumidos no mundo. Devido à sua multiplicidade de aplicações, quer na alimentação humana quer na alimentação animal, assume relevante papel socioeconômico, além de constituir-se em indispensável matéria-prima para inúmeros complexos agroindustriais (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004).

Na safra 2007/2008, a área cultivada com milho no Brasil foi de 14.775,7 mil hectares, com produção de 58.663,3 mil t de grãos e produtividade de 3,97 t ha⁻¹ (CONAB, 2009).

No Estado de São Paulo, de acordo com dados levantados pela Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI), no ano de 2007 as produções de milho irrigado, não irrigado e safrinha totalizaram 4.349.770 t em 917.712 hectares, com produtividade média de aproximadamente 4,74 t ha⁻¹ e movimentando R\$ 1.558.437.169,96 (IEA, 2009).

Além de sua importância econômica, a grande exigência de nitrogênio pelo milho torna essa cultura altamente influenciada pela adubação nitrogenada (CANTARELLA, 1993), fato que justificou sua escolha como cultura teste para avaliar se o uso de DCD pode proporcionar incrementos na absorção de N do fertilizante e consequentemente de produção de grãos.

2.2. Nitrogênio e nitrificação

O nitrogênio (N) é o nutriente requerido em maior quantidade pela cultura do milho. Em épocas em que as condições climáticas são favoráveis à cultura, a quantidade de N requerida para otimizar a produtividade de grãos pode alcançar valores superiores a 150 kg ha⁻¹, o que justifica a necessidade de se usar fertilizantes nitrogenados para fornecer N para a cultura e repor o N do solo (AMADO et al., 2002)

Os fertilizantes nitrogenados são produzidos principalmente a partir de combustíveis fósseis não renováveis, fato que torna o N geralmente o elemento mais caro no sistema de produção da cultura. Além disso, o N está sujeito a inúmeras reações

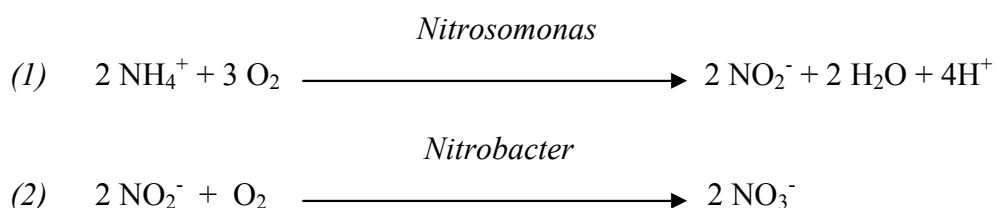
no solo, devido ao complexo ciclo desse nutriente. Dessa forma, recomendações de adubações nitrogenadas devem ser bem planejadas, pois quando se utiliza N em quantidades excessivas ou situações desfavoráveis, ele pode ser perdido, ocasionando prejuízos econômicos e ambientais (CANTARELLA & MARCELINO, 2008).

A uréia é o principal fertilizante sólido no mercado mundial, e apresenta como vantagens o menor preço por unidade de N, alta concentração de N, alta solubilidade, menor corrosividade, compatibilidade com um grande número de outros fertilizantes e defensivos e alta taxa de absorção foliar (CANTARELLA, 2007). No Brasil esse produto representa cerca de 60% dos fertilizantes nitrogenados comercializados (CANTARELLA et al., 2008).

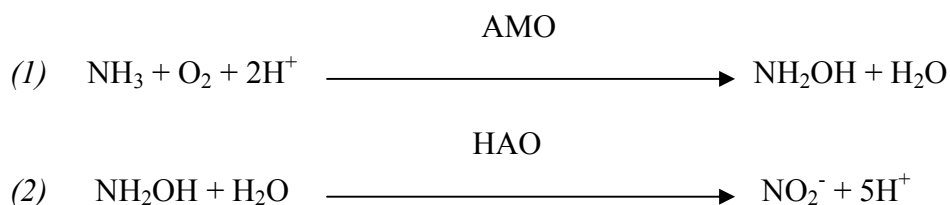
A principal desvantagem da uréia é a possibilidade de altas perdas de N por volatilização de NH₃. Porém, em solos ácidos, como os que predominam no Brasil, a aplicação de uréia incorporada a 5 cm ou mais de profundidade no solo é suficiente para controlar essas perdas e fazer com que o N, proveniente de sua hidrólise, fique na forma de NH₄⁺, que é estável (CANTARELLA & MARCELINO, 2007).

Entretanto, se por um lado a incorporação da uréia diminui as perdas por volatilização de NH₃, por outro, não faz com que o N da uréia deixe de estar sujeita às perdas de NO₃⁻ por lixiviação (SANGOI et al., 2003), uma vez que a presença de NH₄⁺ é condição para que o processo de nitrificação se inicie no solo.

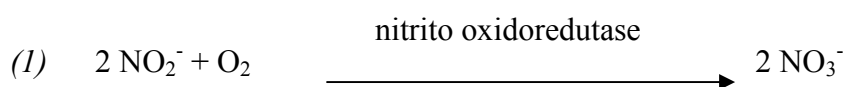
A nitrificação pode ser definida como uma oxidação biológica em que o amônio, tanto o proveniente da mineralização da matéria orgânica do solo, quanto o de fertilizantes amídicos ou amoniacais, é convertido a nitrato por microorganismos do solo. Basicamente, pode-se dividir o processo em duas fases, sendo que na primeira ocorre a formação de nitrito por ação das bactérias do gênero *Nitrosomonas* e na segunda ocorre a formação de nitrato por ação das bactérias do gênero *Nitrobacter*. Nos dois casos, as bactérias são conhecidas como nitrobactérias e são quimioautotróficas – fixam CO₂ com a energia obtida nessas reações - obrigatoriamente aeróbicas (TISDALE et al., 1985).



De acordo com MYROLD (1998), na primeira fase da nitrificação, em que a amônia se oxida a nitrito, ocorre ganho energético de 65 Kcal mol⁻¹ de amônia utilizada. Essa fase pode ser subdividida em outras duas fases: na primeira, a amônia é convertida em hidroxalamina por meio da ação da enzima amônia monoxigenase (AMO); na segunda, mediante vários processos, a hidroxalamina é convertida em nitrito, com participação da enzima hidroxalamina oxidoreductase (HAO).



A segunda fase da nitrificação, a oxidação do nitrito a nitrato, é realizada em apenas uma etapa, com participação da enzima nitrito oxidoreductase e ganho energético de 18 Kcal mol⁻¹ nitrito utilizado.



Essas reações também podem ser mediadas por microorganismos heterotróficos, como bactérias, fungos e actinomicetos, porém, as nitrobactérias são consideradas mais efetivas e de maior importância para este processo no sistema solo (BUCKMAN & BRADY, 1969).

SAHRAWAT (2008) fez uma revisão sobre os diversos fatores físicos, químicos e ambientais que afetam a nitrificação nos solos e concluiu que os principais impactantes na ocorrência natural desse processo são textura, umidade, aeração, pH e temperatura do solo. O conhecimento desses fatores e, principalmente da interação entre os mesmos, permite o desenvolvimento de tecnologias para a regulação da nitrificação nos solos.

Em solos bem drenados e com reação neutra a levemente ácida, grande parte dos solos encontrados no Brasil, predomina o N na forma nítrica (NO₃⁻), devido à velocidade de oxidação do NO₂⁻ ser maior que a do NH₄⁺ (TISDALE et al., 1985). Isso pode ser explicado em parte, pelo baixo ganho energético da oxidação do NO₂⁻ a NO₃⁻, 18 Kcal mol⁻¹, comparado com 65 Kcal mol⁻¹ para oxidação do NH₄⁺ a NO₂⁻, que

permite constatar que as bactérias do gênero *Nitrobacter* têm de processar maior quantidade de substrato para sobreviver (CANTARELLA, 2007).

A maior preocupação com o excesso de nitrato nos solos, é que ele é um elemento facilmente perdido por lixiviação, além de estar sujeito a perdas por desnitrificação (FRYE, 2005). A lixiviação ocorre devido à predominância de cargas negativas na camada superficial do solo e à baixa interação química do NO_3^- com os minerais do solo, que fazem que esse ânion seja perdido, acompanhando o movimento descendente da água que percola no perfil do solo (CANTARELLA & MARCELINO 2008).

Quando lixiviado, o NO_3^- pode comprometer a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, além de provocar a eutrofização das águas superficiais (PIERZYNKI et al., 2000).

A desnitrificação ocorre quando o NO_3^- é perdido para a atmosfera por meio de gases (NO , N_2O , N_2) produzidos em reações desse elemento no solo. Esse processo ocorre principalmente em condições anaeróbias, comum em solos inundados, onde todo o NO_3^- presente no solo pode ser rapidamente perdido por meio dos gases provenientes da desnitrificação. Porém, mesmo em condições parcialmente anaeróbias, onde sítios anaeróbios podem existir em um solo predominantemente aeróbio, acredita-se que possa haver perdas entre 5 e 30% do N aplicado como fertilizante (CANTARELLA, 2007). BREMNER (1997) indica que durante o processo de nitrificação também pode haver formação de N_2O .

O N_2O contribui para o processo de aquecimento global por meio de incrementos no efeito estufa e causa redução da camada de ozônio; o NO pode provocar chuvas ácidas (PIERZYNKI et al., 2000).

Outro ponto a se considerar é que, além de nitrato, a reação de nitrificação libera no solo íons de hidrogênio, que contribuem significativamente para a acidificação dos solos agrícolas, especialmente aqueles adubados com fertilizantes nitrogenados amoniacais (CANTARELLA, 2007; SIMEK, 2000).

Tanto as condições favoráveis à nitrificação quanto à lixiviação de NO_3^- estão presentes na maioria dos solos brasileiros durante o período de cultivo do milho de primavera-verão (CANTARELLA & MARCELINO, 2008). Dessa forma, as preocupações ligadas ao excesso de nitrato nos solos, aliadas à questão econômica, pois o nitrogênio é o nutriente mais caro fornecido às plantas, justificam a necessidade de esforços para se aumentar a eficiência das adubações nitrogenadas (FRYE, 2005).

2.3. Estratégias para aumentar a eficiência de uso de N

A maior parte dos fertilizantes nitrogenados comumente utilizados na agricultura brasileira para a cultura do milho é solúvel em água, tais como a uréia, o sulfato de amônio e o nitrato de amônio, e libera rapidamente no solo as formas de N prontamente assimiláveis pelas plantas, NO_3^- e NH_4^+ , que também são as formas de N mais susceptíveis a perdas do sistema agrícola (CANTARELLA & MARCELINO, 2008).

A estratégia mais comum é adequar a aplicação do fertilizante nitrogenado às necessidades da cultura, levando em conta as características do produto usado. Assim, para minimizar perdas por lixiviação, recomenda-se o parcelamento da adubação de forma que o N seja fornecido nos períodos que antecedem a maior demanda e quando as plantas já tenham o sistema radicular desenvolvido o suficiente para absorver o nutriente (RAIJ et al., 1996). Para evitar perdas por volatilização de NH_3 com o uso de uréia, o meio mais eficiente é incorporar o fertilizante ao solo a profundidade mínima de 3 a 5 cm por meio mecânico ou irrigação (ERNST & MASSEY, 1960).

Porém, há situações em que o manejo do N, citado acima, é difícil, em função da premência de tempo, da pouca disponibilidade de máquinas, de espaçamentos estreitos entre linha para a passagem de tratores, do custo ou dificuldade de incorporação do fertilizante ao solo, das condições climáticas adversas, etc; nesses casos, outras opções para aumentar a eficiência de uso do elemento pelas culturas, relacionadas às características dos fertilizantes podem ser consideradas (CANTARELLA et al., 2008).

Dentro desse conceito, a Associação Americana de Agentes para o Controle de Nutrientes de Plantas (AAPFCO), definiu os "Fertilizantes com Eficiência Aumentada" (Enhanced-Efficiency Fertilizers), que podem ser classificados em: (a) "Fertilizantes de Liberação Lenta ou Controlada" em relação a uma fonte solúvel de referência e (b) "Fertilizantes estabilizados" que contêm aditivos para aumentar o tempo de disponibilidade no solo (HALL, 2005).

Os fertilizantes de liberação lenta ou controlada são classificados basicamente em dois grupos: um deles é formado por compostos de condensação de uréia e uréia-aldeídos, caracterizados por baixa solubilidade, e, portanto, de liberação lenta do N; o segundo, de produtos encapsulados ou recobertos, ou de liberação controlada. De menor importância são as uréias supergrânulos (grânulos de 1 a 4 g) e outros produtos (TRENKEL, 1997).

Os fertilizantes estabilizados são os que contêm aditivos, como inibidores de nitrificação e inibidores de urease, ou mesmo os fertilizantes que contenham os dois ao mesmo tempo (TRENKEL, 1997).

De forma geral, os fertilizantes estabilizados possuem maior importância no mercado de fertilizantes usados na cultura do milho do que os fertilizantes de liberação lenta ou controlada, devido ao alto custo de produção destes últimos, que restringe seu uso a nichos de mercado de alto valor agregado, tais como viveiros de mudas, campos esportivos e jardinagem. Estima-se que apenas 8 a 10% dos adubos de liberação lenta sejam utilizados na agricultura na Europa (LAMMEL, 2005; SHAVIV, 2005) e, em 2003, correspondiam a apenas 0,25% do total de N de fertilizantes químicos comercializados no mundo, ou 1,1% do total nos Estados Unidos (HALL, 2005).

Apesar da baixa expressividade no mercado, há grande interesse em produtos com essas características, devido à possibilidade de diminuição das perdas de N por lixiviação, volatilização e liberação gradual do N às plantas, reduzindo a necessidade de parcelamentos na aplicação.

2.4. Inibidores de nitrificação

Práticas que tenham por objetivo inibir a nitrificação são bem vindas na agricultura, uma vez que resultam na conservação do fertilizante nitrogenado no solo e no aumento da eficiência de uso de N pela cultura. Teoricamente, ao inibir a conversão de amônia, amônio e uréia em nitrato, pode-se reduzir as perdas de N associadas aos processos de lixiviação e desnitrificação, atingindo assim, benefícios ambientais e econômicos (SCHMIDT, 1982).

Os inibidores de nitrificação são compostos que foram desenvolvidos para satisfazer essa necessidade, pois diminuem a formação de NO_3^- no solo, fazendo com que o N na forma amoniacal, que é menos sujeito à lixiviação, fique preservado no solo por mais tempo (TRENKEL, 1997).

Eles atuam na primeira fase da nitrificação, interferindo na atividade das bactérias do gênero *Nitrosomonas*, sendo capazes de retardar a oxidação do amônio a nitrito por determinado período de tempo. Dessa forma, a segunda fase da nitrificação não ocorre, pois faltaria nitrito para se oxidar a nitrato (TRENKEL, 1997).

Mais especificamente, os inibidores de nitrificação afetam a ação da enzima amônia monoxigenase (AMO), que é uma proteína da membrana das *Nitrosomonas*. No

processo de oxidação catalítica a NH_3 se liga ao sítio ativo da enzima e se oxida a hidroxalamina. Entretanto, os inibidores de nitrificação têm afinidade pelo mesmo sítio ativo da enzima, e por princípio de competição, se ligam a este, inibindo o processo por mais ou menos tempo, dependendo da estabilidade do composto (MCCARTY, 1999).

Um bom inibidor de nitrificação deve ser móvel, de forma que se mova junto com o fertilizante, persistente, atuando no período que a cultura exigir e acima de tudo, economicamente viável. Além disso, não pode ser tóxico aos organismos do solo, seres humanos e animais (PRASAD & POWER, 1995).

Para a cultura do milho, que preferencialmente absorve o íon amônio (NH_4^+) nos primeiros estádios de desenvolvimento e o íon nitrato (NO_3^-) nos estádios finais (WARNCKE & BARBER, 1973), este tipo de composto pode ser útil. Dessa forma, o fertilizante amoniacal com o inibidor forneceria NH_4^+ para a cultura no início do seu desenvolvimento e, num momento posterior, quando as raízes de milho explorassem maiores profundidades no solo, o efeito do inibidor diminuiria/cessaria e se iniciaria o fornecimento NO_3^- .

Há vários produtos conhecidos com potencial de inibição de nitrificação. Entre os mais efetivos e com boa aceitação no mercado estão nitrapirina (NI) e dicianodiamida (DCD) (FRYE, 2005; TRENKEL, 1997). Recentemente foi desenvolvido um novo composto, 3,4-dimetilpirazole-fosfato (DMPP), que vem apresentando bons resultados como inibidor de nitrificação, além de proporcionar incrementos na produção e qualidade de várias culturas agrícolas (PASDA et al., 2001; WEISKE et al., 2001; ZERULLA et al., 2001).

A nitrapirina é o inibidor comercializado há mais tempo nos EUA, sendo recomendada para uso com fertilizantes nitrogenados amoniacais. Sua taxa de aplicação é relativamente baixa, variando de 0,4 a 1,4 kg ha^{-1} do ingrediente ativo e seu efeito inibidor se manifesta geralmente por seis a oito semanas (TRENKEL, 1997).

Uma desvantagem da nitrapirina é possuir pressão de vapor relativamente alta, que faz com que tenha tendência de volatilizar, o que tem levado o fabricante a recomendar a incorporação do produto ao solo logo após a aplicação (FRYE, 2005). O uso de nitrapirina tem se restringido aos EUA, país onde é comum o uso de amônia anidra. A maior parte da nitrapirina consumida nesse país é utilizada na cultura do milho (TRENKEL, 1997).

CHANCY & KAMPRATH (1982), avaliaram a resposta do milho à adição de nitrapirina (1,12 kg ha^{-1}) na adubação nitrogenada (112 $\text{kg N-Uréia ha}^{-1}$) em solos

arenosos por dois anos agrícolas; no segundo ano, em que houve maior precipitação pluvial e os adubos foram aplicados a lanço e incorporados 12 dias antes do plantio, a adição de nitrapirina à uréia proporcionou menores perdas de N do solo, aumentando a produtividade de grãos de 2,97 para 6,09 t ha⁻¹, além de promover acréscimos na concentração de N na folha, acumulação de N na planta e recuperação aparente de N do fertilizante.

CHRISTENSEN & HUFFMAN (1992), por meio de vários experimentos com milho em campo, demonstraram que com o uso de nitrapirina, é possível aumentar a eficiência de uso do N quando ele é aplicado em pré-semeadura. Em seis anos de estudo, eles constataram que a produtividade de grãos foi superior nos tratamentos que receberam adição de 0,56 kg ha⁻¹ do inibidor, nas três doses de adubação nitrogenadas (90, 134 ou 179 kg de N ha⁻¹).

A dicianodiamida apresenta poder de inibição relativamente menor que o da nitrapirina, sendo necessária a aplicação de doses maiores para se obter boas taxas de inibição. Formulações de fertilizantes amoniacais que contêm o inibidor geralmente possuem 5 a 10% do N total na forma de DCD para se obter inibição por seis a oito semanas (TRENKEL, 1997). Entretanto, seu custo de produção é menor e a DCD tem a vantagem de ser também um fertilizante nitrogenado de liberação lenta (com aproximadamente 66,7% de N), que, em algumas semanas, se decompõe completamente no solo em NH₄⁺ e CO₂ (MCCARTY & BREMNER, 1989). Além disso, a DCD é solúvel em água e pouco volátil, podendo ser armazenada indefinidamente em condições secas. Essas características a tornam apta para ser utilizada junto a fertilizantes amoniacais sólidos, tais como uréia e sulfato de amônio, e fluidos, como uran (FRYE et al., 1989).

Outra característica vantajosa da DCD em relação à nitrapirina é possuir efeito bacteriostático e não bactericida no solo, com efeito específico para bactérias nitrificadoras do gênero *Nitrosomonas*. Estudos realizados indicam que concentrações de 200 a 300 mg L⁻¹ de DCD em meio de cultura com esses microorganismos são capazes de inibir a formação de NO₂⁻. Entretanto, esses mesmos microorganismos, depois de transferidos para um meio livre de DCD, recuperam em até 90% suas capacidades originais de oxidar NH₄⁺ (AMBERGER, 1989).

MCCARTY & BREMNER (1989) avaliaram a eficiência da dicianodiamida em solos incubados em laboratório, fertilizados com sulfato de amônio. Eles utilizaram diferentes doses de DCD, tipos de solo, temperaturas de incubação e épocas de

avaliação. Eles observaram que DCD se decompõe mais rapidamente em solos argilosos, com alto teor de matéria orgânica e altas temperaturas; sendo assim, os melhores resultados de inibição foram obtidos em solos arenosos, com baixo teor de matéria orgânica e baixas temperaturas. Porém, estes mesmos autores demonstraram através de experimento em colunas, que a DCD, por ser um composto de solubilidade em água relativamente alta, pode estar sujeita a perdas por lixiviação, o que torna necessário maiores estudos envolvendo a adição de DCD em solos de textura leve.

MALZER et al. (1989) conduziram durante 13 anos, diversos experimentos nos EUA envolvendo o uso de DCD e nitrapirina na cultura do milho e concluíram que as maiores respostas ao uso de inibidores de nitrificação foram obtidas em solos arenosos. Geralmente a eficiência de DCD foi superior à da nitrapirina quando se usou urânio e uréia, sendo que para esta última, quando aplicada em pré-plantio na primavera, em 20 comparações com e sem DCD, houve resposta significativa favorável em 9, com porcentagem média de incrementos relativos de 27,1%.

MASON (1987) observou que uréia tratada com DCD (na dose de 10% do N total) reduziu a oxidação do N amoniacal até os 30 dias comparada com a uréia não tratada. COOKSON & CORNFORTH (2002), utilizando DCD nas doses de 10 e 25 kg ha⁻¹ em áreas de pastagem, constataram que a concentração de nitrato no solo foi reduzida de 140 para 60 e 35 ppm, o que levou à diminuições na lixiviação de nitrato da ordem de 54 e 73%, respectivamente.

Estudos conduzidos na região sudeste dos Estados Unidos indicam que de forma geral, a DCD inibiu a nitrificação por algumas semanas, porém essa inibição nem sempre refletiu em incrementos de produção; isso geralmente ocorreu quando a DCD foi adicionada aos tratamentos com baixas doses de N (FRYE et al., 1989).

Na Alemanha, BUERKERT et al. (1995) conduziram experimentos de campo com milho para silagem, comparando três tratamentos de adubações nitrogenadas na dose de 200 kg N ha⁻¹ (aplicação de N-NH₄⁺ com DCD em pré-plantio; aplicação de N-NO₃⁻ em pré-plantio; aplicação de N-NO₃⁻ parcelada em pré-plantio e 45 dias após o plantio) e mais um controle, sem aplicação de N. Entretanto, uma vez que as perdas de N por lixiviação entre a aplicação do fertilizante e o início da absorção de N pelas plantas foram desprezíveis, a produção final de matéria seca e a absorção de N não foram significativamente afetadas pelas fontes de N ou época de aplicação e, conseqüentemente, nem o uso do inibidor, nem o parcelamento da adubação apresentaram vantagens agronômicas.

Um experimento foi conduzido em 1983 e 1984 na Flórida (EUA) para determinar a efetividade da DCD como inibidor de nitrificação na cultura do milho. Foram avaliadas três doses de N-uréia (62, 124 e 248 kg ha⁻¹) e três de DCD (0, 11,2 e 22,4 kg ha⁻¹) interagindo em um solo arenoso. Os adubos foram aplicados em pré-plantio ou parcelados, com 40% da dose em pré-plantio e 60% da dose em cobertura, seguidos de incorporação. Em 1983, DCD na dose de 11,2 kg ha⁻¹ (5 mg kg⁻¹ solo) aumentou a produção de grãos em 29 e 40% quando aplicado com 62 e 124 kg N ha⁻¹ e comparado às mesmas doses de N sem adição de DCD. Na dose de 248 kg N ha⁻¹, não houve incrementos de produção. Dobrando a dose de DCD também não foi observado aumento na efetividade do inibidor. Já em 1984, repetindo esse experimento, a adição de DCD não proporcionou incrementos na produção; acredita-se que duas fortes chuvas, de 140 e 160 mm ocorridas cerca de 3 e 4 semanas, respectivamente após a aplicação dos tratamentos, tenha separado a DCD da uréia por lixiviação, diminuindo sua efetividade (FRYE et al., 1989). Esse mesmo fenômeno é lembrado por BOCK et al. (1981), que relatam que a DCD é muito solúvel em água e pode ser perdida por lixiviação.

SAHRAWAT et al. (1987) avaliaram a eficiência de DCD em laboratório, mediante adição do inibidor em solo com e sem adição de amônio, incubado aerobicamente a 30°C. Doses de 20 mg de DCD kg⁻¹ de solo foram eficientes em retardar a nitrificação do amônio por 14 dias, quando este foi aplicado; porém, quando não houve adição de amônio, DCD não foi eficiente impedindo a formação de nitrato, mesmo na dose de 100 mg kg⁻¹ solo.

Na Nova Zelândia, onde perdas por de lixiviação de nitrato e emissão de N₂O para atmosfera têm sido observadas em áreas de pastejo intensivo devido ao N-uréia proveniente da urina dos animais, vários estudos com DCD foram conduzidos nos últimos anos (CAMERON & DI, 2004; DI & CAMERON, 2003, 2004 a, 2004 b, 2005, 2006; DE KLEIN & LEDGARD, 2005). Aplicações de DCD nas doses de 7,5 e 15 kg ha⁻¹ foram efetivas em reduzir a lixiviação de nitrato e a emissão de N₂O, especialmente em temperaturas mais frias (DI & CAMERON, 2004 a). A meia vida da DCD a 8°C foi de 111-116 dias e a do NH₄⁺ aumentou de 44 para 243-491 dias pela aplicação de DCD nas doses de 7,5 e 15 kg ha⁻¹ respectivamente. Já a 20°C, a meia vida de DCD foi de 18-25 dias e a do NH₄⁺ aumentou de 22 para 64-55 dias nas doses de 7,5 e 15 kg ha⁻¹ respectivamente. Além disso, o uso de DCD não ocasionou efeitos adversos à biomassa microbiana do solo (DI & CAMERON, 2004 a).

Em incubações em laboratórios, PUTTANNA et al. (1999) estudaram a eficiência de DCD como inibidor de nitrificação quando aplicado junto com uréia em um solo franco-arenoso. Eles trabalharam com concentrações de 5 a 15 mg DCD kg⁻¹ solo, temperatura de 10 a 30°C, umidade de 40 a 80% da saturação do solo, pH de 5,4 a 8,3 e presença ou ausência de matéria orgânica fresca. A DCD proporcionou os melhores resultados como inibidor de nitrificação na dose de 15 mg DCD kg⁻¹ solo, na temperatura de 10° C, em solo com 40% de umidade, em pH de 5,4, independente da presença do material orgânico.

DI & CAMERON (2004 b), relataram que uma vez que a inibição da nitrificação diminui a lixiviação de nitrato, o uso de DCD pode indiretamente diminuir as perdas de lixiviação de bases tocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺), que seriam carregadas em profundidade pelo íon NO₃⁻. A adição de DCD reduziu a lixiviação de Ca²⁺, K⁺ e Mg²⁺ em 50%, 65% e 52%, respectivamente.

O uso de DCD foi estudado associado ao inibidor de urease NBPT, na tentativa de melhorar a eficiência da adubação nitrogenada. GIOACCHINI et al. (2002) utilizaram uréia marcada com o isótopo estável ¹⁵N para observar a influência dos respectivos inibidores de nitrificação e urease. O tratamento com DCD + NBPT aumentou as perdas de NH₃ por volatilização em relação ao tratamento só com NBPT, provavelmente por proporcionar a manutenção de NH₄⁺ no solo por mais tempo. Quanto às perdas por lixiviação, o tratamento com DCD + NBPT também foi o que apresentou as maiores perdas, uma vez que a manutenção de NH₄⁺ no solo pode ter provocado um “efeito priming”, mineralizando o nitrogênio da matéria orgânica do solo, aumentando ainda mais o N disponível e o deixando susceptível á lixiviação. RAJBANSHI et al. (1992) também citam que o uso de DCD pode aumentar as perdas de amônia por volatilização em solos alcalinos, mas lembra que se o adubo for incorporado logo após a aplicação essas perdas são drasticamente reduzidas.

O DMPP é o um inibidor desenvolvido recentemente, mas já comercializado em diversos países na Europa e, em pequena escala, no Brasil. Dados de pesquisa permitem atribuir ao DMPP compatibilidade física com fertilizantes granulados, sendo bastante eficiente para inibir a nitrificação, mesmo aplicado em doses baixas. A aplicação de 0,5 a 1,5 kg DMPP ha⁻¹, dependendo da quantia do N aplicado, é suficiente em condições de campo para inibir a nitrificação pelo período de 4 a 10 semanas em clima temperado. Geralmente o DMPP é recomendado na dose de 1% em relação à quantidade de N-NH₄⁺

ou N-amida dos fertilizantes. Além disso, ele possui baixa toxidez, sendo bem tolerado pelas plantas (ZERULLA et al., 2001).

Na Europa, de 1997 a 1999, PASDA et al. (2001) conduziram 136 experimentos de campo, com várias culturas e sob diversas condições edafoclimáticas, para verificar o efeito de fertilizantes nitrogenados tratados com DMPP sobre a produção e qualidade de diversas culturas agrícolas. Na cultura do milho, resultados médios de 14 experimentos, utilizando-se 140 kg ha^{-1} de N na forma de sulfato nitrato de amônio ($18,5\% \text{ N-NH}_4^+ + 7,5\% \text{ N-NO}_3^-$) com ou sem DMPP na dose de 1% do N-NH_4^+ do fertilizante, indicaram que a adição do inibidor aumentou a produção de grãos em 2,64%, e não comprometeu as demais variáveis estudadas.

Assim como a DCD, o DMPP também tem sua eficiência de uso reduzida quando submetido à altas temperaturas. IRIGOYEN et al. (2003) realizaram estudos em laboratório que indicam que a DCD e o DMPP possuem comportamento parecido ao inibir a nitrificação, e apresentam efeito inibitório de 1 semana, 1 mês e mais de 3 meses, a 30, 20 e 10°C, respectivamente.

Na literatura não são encontrados relatos de uso de DCD e NI em condições de campo no Brasil. Já para o DMPP há alguns trabalhos recentes que vem sendo desenvolvidos, mas aparentemente ele não tem proporcionado retornos econômicos nas condições em que vem sendo testado.

BUZETTI et al. (2007) conduziram um experimento com milho, em latossolo vermelho distrófico de área de cerrado com irrigação, para comparar os efeitos de diferentes fontes de N (Entec, sulfato de amônio e uréia), épocas de aplicação (semeadura e cobertura) e doses de N (0, 50, 100, 150 e 200 kg de N ha^{-1}), no teor foliar do elemento, componentes da produção e produtividade de grãos do milho. O Entec, produto comercial que contém sulfonitrato de amônio tratado com DMPP, não proporcionou incrementos na produtividade de grãos quando comparado com as fontes sem o inibidor de nitrificação.

Em experimento semelhante, foram estudados o efeito de doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em um latossolo vermelho distroférico. Mais uma vez, o uso do Entec, não proporcionou incrementos de produtividade de grãos, comparado à uréia e ao sulfato de amônio (SOUZA et al., 2008).

De fato, esses três compostos relatados (NI, DCD e DMPP) apresentam resultados consistentes retardando a nitrificação quando testados em condições controladas de laboratório. Entretanto a efetividade desses inibidores é menor quando

examinados sobre condições de campo para várias culturas (DINNES et al., 2002; WEISKE et al., 2001; WOLT, 2004 - citado por FILLERY, 2007).

A degradação microbiológica dos inibidores no solo em altas temperaturas (DI & CAMERON, 2004; IRIGOYEN et al., 2003; PUTTANNA et al., 1999) e a possível lixiviação dos próprios inibidores para fora da zona de nitrificação (ABDEL-SABOUR et al., 1990; MCCARTY & BREMNER, 1989) são fatores que podem justificar as diferentes performances dos inibidores sob condições de campo (FILLERY, 2007).

Além disso, o alto custo dos inibidores sintéticos é um outro fator que limita seu uso na agricultura, onde a margem de lucro geralmente é pequena e o retorno do investimento é incerto (FILLERY, 2007).

Nesse contexto, SUBBARAO et al. (2006) expõem o conceito dos inibidores biológicos de nitrificação (BNI). Por meio de técnicas de biologia molecular, eles trabalharam com bactérias luminescentes da espécie *Nitrosomonas europaea*, que permitiram detectar o efeito de inibidores de nitrificação de compostos produzidos e liberados pelas plantas. De 18 espécies vegetais testadas, entre pastagens tropicais e temperadas, cereais e legumes, os autores destacaram as espécies de *Brachiaria* como de alta atividade de BNI, principalmente a *Brachiaria humidicola*. Esses compostos BNI liberados pelos exudatos das raízes quando adicionados ao solo foram efetivos e proporcionaram efeitos inibitórios por mais de 50 dias. Diferentemente dos inibidores de nitrificação sintéticos, que geralmente inibem a nitrificação bloqueando a ação da enzima amônia monoxinase (AMO), esses compostos BNI aparentam bloquear também a ação da enzima hidroxalmina oxidoreductase (HAO), agindo, portanto, nas duas etapas da primeira fase da nitrificação (SUBBARAO et al., 2006).

No Brasil, esse efeito já parece ser constatado. SOUZA et al. (2006), avaliaram os efeitos alelopáticos da *Brachiaria decumbens* sobre outras sete espécies de plantas cultivadas e sobre a dinâmica do N no solo. A incorporação da parte aérea seca da *Brachiaria* no solo reduziu significativamente os teores de nitrato no solo, possivelmente pela inibição do processo de nitrificação (SOUZA et al., 2006).

2.5. Adubação nitrogenada no milho em sistema plantio direto no Brasil

No Brasil, existem poucos trabalhos em que perdas de NO_3^- por lixiviação tenham sido constatadas em sistemas agrícolas. CANTARELLA (2007) reuniu vários trabalhos da literatura brasileira mostrando que, de modo geral, as perdas de NO_3^- por

lixiviação relatadas para a cultura de milho têm sido baixas. As explicações mais prováveis são o uso de doses de N relativamente baixas, a textura argilosa da maioria dos locais e o parcelamento da adubação nitrogenada, no qual a maior parte do N é aplicada no período de ativa absorção de N pelas plantas. A imobilização pela microbiota do solo também colabora para reduzir esse tipo de perda (COELHO et al., 1991).

A ausência de relatos sobre perdas de N por lixiviação de NO_3^- , aliados aos trabalhos realizados por SÁ (1996) e CERETTA (1997), levaram muitos agricultores à antecipar a adubação nitrogenada de cobertura para o milho, na tentativa de otimizar a utilização de máquinas na propriedade.

SÁ (1996) propôs o método de adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho, que consiste na antecipação da aplicação do N de cobertura do milho para o momento da dessecação da aveia preta cultivada no inverno. Este método tem por objetivo eliminar a possível deficiência de N no início do desenvolvimento da planta devido à imobilização do mesmo pela palhada da aveia preta, que tem alta relação C/N.

Porém, este é um método arriscado; recentemente vários autores constataram que chuvas intensas no início do ciclo do milho, que não são incomuns no verão, podem levar à menor eficiência de uso do N, principalmente por causa de perdas de N por lixiviação de nitrato.

BASSO & CERETTA (2000) estudaram em Argissolo Vermelho distrófico arênico o efeito da antecipação da adubação nitrogenada na cultura do milho em plantio direto. Eles utilizaram 120 kg ha^{-1} de N-uréia distribuídos em três épocas de aplicação (pré-semeadura, semeadura e cobertura) e concluíram que a aplicação de N em pré-semeadura no milho tem alto risco, sendo mais segura a aplicação de N na semeadura e em cobertura.

Também em Argissolo Vermelho distrófico arênico, BERTOLINI et al. (2001) estudaram o rendimento de grãos de milho cultivado após aveia preta em resposta a adubação nitrogenada e regime hídrico. Eles trabalharam com sete combinações de doses de uréia, distribuídas entre pré-semeadura, semeadura e cobertura, além de dois regimes hídricos – um adequado às exigências da cultura e outro em excesso. Com a antecipação da aplicação de N da cobertura para a época de pré-semeadura, o rendimento de grãos de milho foi menor em relação ao obtido com a aplicação na época convencional, principalmente sob alta disponibilidade hídrica e com elevada dose de adubação nitrogenada.

CERETTA et al. (2002) conduziram experimentos em quatro localidades no Rio Grande do Sul (três em Argissolos Vermelhos com porcentagem de argila entre 42 e 70% e um em Latossolo Vermelho com 70% de argila), na sucessão aveia preta - milho no sistema plantio direto, com o objetivo de avaliar a melhor forma de adubação nitrogenada. Eles utilizaram doses de 90 a 150 kg N ha⁻¹, distribuídas em três épocas de aplicação: pré-semeadura, semeadura e cobertura. Eles concluíram que a adubação em pré-semeadura não conferiu produtividades inferiores às outras duas épocas, porém, alertam que a ocorrência de precipitações pluviais acima do normal pode causar diminuição na produtividade e recomendam que a adubação do milho seja realizada em semeadura e em cobertura.

MAI et al. (2003), trabalhando com milho em sucessão a aveia preta em SPD num Latossolo Vermelho distroférico argiloso e realizando adubações com 90 kg N-UR ha⁻¹, relataram que embora a aplicação de N em pré-semeadura de milho proporcione maior teor de N no solo no início do desenvolvimento dessa gramínea, a aplicação de N em cobertura propicia a obtenção de maiores produtividades de grãos.

POTTKER & WIETHOLTER (2004) realizaram cinco experimentos em Latossolos Vermelhos distróficos com milho em sucessão a aveia preta no SPD e adubação de 100 kg N ha⁻¹ na forma de uréia para avaliar duas formas (superfície e incorporado) e três épocas de aplicação do N (pré-semeadura, semeadura, semeadura e cobertura). Eles concluíram que em safras com precipitações pluviais normais, a aplicação de N nas três épocas não diferiu estatisticamente, devendo-se optar pela época que represente o menor custo. Já em safra com elevada precipitação nos estádios iniciais de desenvolvimento do milho, a aplicação de N parcelado na semeadura e cobertura proporcionou rendimento de milho superior à aplicação em pré-semeadura e na semeadura. Quanto à forma de aplicação, o N incorporado proporcionou rendimentos 5% maiores que o N em superfície.

SILVA et al. (2005), trabalhando em Latossolo Vermelho distrófico com 66% de argila, também estudaram a melhor época e forma de aplicação do N na cultura do milho em SPD. Eles usaram 120 kg de N ha⁻¹ na forma de uréia, aplicados superficialmente a lanço ou incorporados na entrelinha e distribuídos em 4 épocas de aplicação (20 dias antes da semeadura do milho, todo na semeadura, 15 dias após a emergência [DAE] e 35 DAE). Os melhores resultados foram obtidos com a incorporação do fertilizante na semeadura ou 15 DAE. A aplicação do N em pré-semeadura, 20 dias antes, demonstrou não ser recomendada para as condições

edafoclimáticas estudadas, pois durante a condução do experimento, houve elevadas precipitações, que podem ter promovido maior lixiviação.

GOMES et al. (2007) estudaram o efeito de doses e da época de aplicação de N-uréia na cultura do milho em plantio direto em Latossolo Vermelho distrófico argiloso. Eles utilizaram seis épocas de aplicação de N (antecipada; semeadura; cobertura com 30 dias; semeadura e cobertura com 30 dias; semeadura e cobertura com 30 e 45 dias; antecipada, semeadura e cobertura com 30 dias) e quatro doses de N (25, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹). A dose de 150 kg ha⁻¹ foi a que proporcionou os maiores rendimentos de grãos, enquanto as épocas de aplicação não diferiram entre si. Devido ao baixo efeito ao N, a maior rentabilidade de aplicação foi obtida com aplicação de 25 kg ha⁻¹ na semeadura.

ARAÚJO et al. (2004) trabalharam com adubação nitrogenada no milho em Latossolo Vermelho distroférrico argiloso. Eles utilizaram parcelas subdivididas, tendo como tratamentos doses de N em cobertura (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹) nas parcelas e sucessão de culturas nas subparcelas (milho-milho-milho e milho-soja-milho). A adubação nitrogenada proporcionou, em relação à testemunha, aumento de 28% (2.448 kg ha⁻¹) na produtividade de grãos de milho. A maior produtividade de grãos, 11.203 kg ha⁻¹, foi alcançada com a maior dose de N (240 kg ha⁻¹). O sistema de sucessão não teve efeito na produtividade, mas os teores de N na massa de matéria seca da parte aérea e nos grãos de milho foram maiores no sistema milho-soja-milho.

Em milho verde, SILVA et al. (2003) em Argissolo Vermelho Amarelo, constataram que o parcelamento da adubação nitrogenada em ½ aos 25 dias após a semeadura (DAS) e ½ aos 45 DAS, ou ⅓ aos 25 DAS e ⅔ aos 45 DAS, resultou em maiores rendimentos de espiga do que a dose completa aplicada na semeadura.

Doses e épocas de aplicação de N também foram avaliadas para milho safrinha. MAR et al. (2003) em Latossolo Vermelho Eutroférrico argiloso, trabalharam com doses de 30 a 150 kg ha de N e 4 épocas de aplicação (E1 - todo N na semeadura e E2, E3 e E4 - ⅓ na semeadura e os outros ⅔ quando a cultura apresentou 4, 8 e 10 folhas completamente desenvolvidas, respectivamente). Até 60 kg ha⁻¹ não houve necessidade de parcelamento; o melhor parcelamento foi ⅓ do N na semeadura e ⅔ em cobertura, quando as plantas apresentavam de 4 a 8 folhas totalmente expandidas, para as doses de 90 e 120 kg ha⁻¹.

Observando o que existe na literatura brasileira sobre o manejo da adubação de milho no sistema plantio direto, nota-se clara importância das características edafoclimáticas da localidade de cultivo, que irão determinar a melhor estratégia de

adubação, incluindo as melhores fontes, doses e épocas de aplicação de N. De forma geral, nota-se que a realização da adubação em pré-semeadura ou apenas na semeadura é uma prática arriscada e pode ocasionar perdas de produção em áreas que estejam sujeitas a elevadas precipitações pluviais no início do ciclo.

2.6. Uso do isótopo ^{15}N

É importante observar que grande parte do nitrogênio absorvido pelas plantas é proveniente da matéria orgânica do solo e não dos fertilizantes; esse fato pode fazer com que as plantas não manifestem efeitos da adubação nitrogenada caso o aporte de N proveniente da matéria orgânica seja suficiente para suprir as necessidades da planta.

Aplicações de métodos com o isótopo estável ^{15}N permitem avaliar as transformações individuais do N no solo, mesmo quando múltiplas transformações ocorrem simultaneamente no meio. Esses métodos traçam o movimento dos dois isótopos de N (^{15}N e ^{14}N) simultaneamente fornecendo informações acerca do sistema, estimando as taxas de transformações do N (TRIVELIN, 2009).

De acordo com KNOWLES & BLACKBURN (1993), citados por BENDASSOLI et al. (2002), esta técnica consiste basicamente no emprego de compostos químicos nos quais a razão isotópica ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) é diferente da natural para avaliar a distribuição do isótopo no sistema em estudo. Nas plantas cultivadas, ela permite a quantificação da utilização do nitrogênio proveniente de adubos aplicados ao solo, assim como o estudo das transformações do nutriente no sistema solo-planta.

DUETE et al. (2008) avaliaram o efeito de doses e parcelamentos de N, na forma de uréia ^{15}N , sobre a produtividade de grãos, o aproveitamento do N do fertilizante e a quantidade de N nativo do solo absorvida pelo milho em um Latossolo Vermelho eutrófico de textura média. Eles trabalharam com cinco doses de N (0, 55, 95, 135 e 175 kg ha⁻¹), aplicando-se 15 kg na semeadura e o restante em diferentes estratégias de parcelamentos: 40 e 80 kg ha⁻¹ no estádio de oito folhas ou ½ no estádio de quatro folhas + ½ no estádio de oito folhas; 120 kg ha⁻¹ fracionados em ½ + ½ ou 1/3 + 1/3 + 1/3 no estádio de quatro, oito ou 12 folhas; e 160 kg ha⁻¹ parcelados em ¼ + 3/8 + 3/8 ou ¼ + ¼ + ¼ + ¼ no estádio de quatro, oito, 12 folhas ou de florescimento e polinização. Por meio do uso da técnica isotópica foi possível constatar que o aproveitamento do N do fertilizante pelo milho foi, em média, de 39 % e o solo foi a principal fonte do nutriente para a cultura. A aplicação de 135 kg ha⁻¹ de N parcelados

em três vezes, até o estágio de oito folhas, proporcionou maior aproveitamento do N do fertilizante (52 %) e maior produtividade de grãos.

Trabalhando com milho em sistema plantio direto sobre palhada de aveia preta, após dois anos de cultivo de soja num Latossolo Vermelho não férrico de textura muito argilosa, LANGE et al. (2008) avaliaram a influência das épocas de parcelamento do N suplementar à semeadura no N foliar e na produtividade de grãos do milho, além de quantificar a recuperação do N do fertilizante, pela técnica da diluição isotópica (^{15}N). Os tratamentos foram 70 kg ha^{-1} de N, como dose suplementar à adubação de semeadura do milho (42 kg ha^{-1}) em épocas distintas (semeadura da aveia-preta; oito dias antes da semeadura do milho; em cobertura, com plantas de quatro a cinco folhas; e em cobertura com plantas de sete a oito folhas). Não houve diferença para o N foliar e produtividade de grãos, quando se aplicou N suplementar à adubação de semeadura ou não, independentemente da época de aplicação. A recuperação do N foi superior no compartimento planta inteira, quando aplicado em cobertura, em relação à aplicação em pré-semeadura. O parcelamento do N em cobertura não melhorou a eficiência de recuperação do fertilizante em relação a uma única aplicação, que foi de 56% para o nitrato de amônio e de 52% para o sulfato de amônio.

CANTARELLA et al. (2003) estudaram por dois anos, a viabilidade da antecipação de N em milho sobre palha de aveia preta no SPD num Latossolo Vermelho argiloso. Eles usaram 80 kg N ha^{-1} , aplicados na época da rolagem da aveia (45 dias antes da semeadura do milho em um ano e 20 dias antes no outro) ou aplicados quando o milho apresentou 6 folhas totalmente expandidas; em ambos os casos, foram aplicados $40 \text{ kg N-UR ha}^{-1}$ na semeadura. Nos dois anos, as médias de precipitações pluviais foram relativamente baixas, o que resultou em poucas perdas por lixiviação de nitrato, mas no primeiro ano, em que as chuvas foram melhor distribuídas no período de crescimento do milho, tanto a recuperação do N quanto o rendimento de grãos foi maior na época convencional do que na antecipada; já no segundo ano, não houve diferença nas variáveis estudadas. Através do uso da técnica isotópica, foi possível identificar que nesses experimentos a recuperação do N proveniente da uréia marcada variou entre 48,3 e 66,4 %.

Essa técnica também foi usada com sucesso para avaliar o comportamento da adubação nitrogenada no Sistema Santa Fé (LARA CABEZAS & PÁDUA, 2007), a possível imobilização de N de fertilizantes em diferentes épocas de aplicação na cultura do milho em SPD (LARA CABEZAS et al., 2005; LARA CABEZAS & COUTO

2007), a influência da cultura antecessora no aproveitamento da adubação nitrogenada no milho em SPD (LARA CABEZAS et al., 2004) e o efeito residual proporcionado por coberturas de solo e fertilizantes nitrogenados ao longo de mais de um ano agrícola (FERNANDES et al., 2008; SILVA et al., 2006).

O Brasil é um dos poucos países do mundo com enorme potencial para aumentar a sua produção agrícola, seja pelo aumento de produtividade, seja pela expansão da área plantada. O uso eficiente de fertilizantes minerais é o fator que, isoladamente, mais contribui para o aumento da produtividade agrícola. Nesse contexto, pesquisas que venham a contribuir para a maximização da eficiência de uso dos fertilizantes tornam-se muito importantes. No Brasil ainda não se tem relatos de uso de dicianodiamida, e espera-se que esse trabalho possa contribuir com informações sobre o comportamento do inibidor em condições brasileiras, visando melhorar o manejo da adubação nitrogenada e minimizar os possíveis problemas ambientais e econômicos decorrentes da sua utilização.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para satisfazer os objetivos propostos, o projeto foi dividido em duas partes: na primeira, um experimento foi desenvolvido em condições controladas de laboratório para avaliar a eficiência de DCD como inibidor de nitrificação quando associado à uréia; na segunda, dois experimentos foram conduzidos em campo, com o objetivo de avaliar a resposta do milho à aplicação de uréia tratada com o inibidor de nitrificação.

3.1. Eficiência de DCD como inibidor de nitrificação quando associado à uréia

Este experimento foi conduzido em condições controladas de laboratório, envolvendo a incubação, em solo, de uréia tratada com diferentes doses de DCD e teve por objetivo avaliar como o inibidor se comporta em condições brasileiras, onde temperaturas relativamente altas predominam durante a maior parte do ano.

No Brasil, não existe um produto comercial que contenha dicianodiamida, e ela também não é comercializada isoladamente para fins agrícolas, então usou-se o inibidor na forma de reagente químico puro para análise, que contém 65% de N. Sendo assim, nesta fase optou-se por também utilizar a uréia na forma de reagente químico puro para análise, com 46 % de N.

O solo utilizado no experimento foi coletado em área do Centro Experimental Central do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), de onde retirou-se os primeiros 20 centímetros de um Latossolo Vermelho eutrófico de textura muito argilosa (EMBRAPA, 2006), cujas características químicas (RAIJ et al., 2001) e físicas (CAMARGO et al., 1986) foram analisadas, estando os resultados descritos nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Caracterização química inicial do solo utilizado para experimentação em laboratório.

pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	S.B.	C.T.C.	V%	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----			-----			%	----- mg dm ⁻³ -----				
5,2	27	43	4,0	27	8	31	39	70	56	0,39	5,2	16	19,2	1,2

Tabela 2 - Caracterização física inicial do solo utilizado para experimentação em laboratório.

Argila (< 0,002 mm)	Silte (0,053 - 0,002 mm)	Areia total (2,00 - 0,053 mm)	Classificação textural
----- g kg ⁻¹ -----			
613	130	257	Muito Argilosa

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado e seis tratamentos foram aplicados, com quatro repetições, em sete épocas de incubação, totalizando 168 parcelas experimentais (24 por época).

Os tratamentos englobaram uma testemunha (solo que não recebeu nenhum aditivo), um controle com solo tratado somente com DCD (para verificar o nível de inibição do N-amoniaco proveniente da decomposição da matéria orgânica nativa), outro controle com solo tratado somente com uréia (para verificar a taxa natural de nitrificação), e três tratamentos em que o solo foi tratado com uréia e doses crescentes do inibidor (6, 12 e 18 mg DCD kg⁻¹ solo, que equivaleram a 20, 40 e 60 g DCD kg⁻¹ N-UR). A uréia foi aplicada na dose de 300 mg N-UR kg⁻¹ solo (Tabela 3).

Tabela 3 - Descrição dos tratamentos empregados no experimento em laboratório.

N.º	Dose N-UR	Dose DCD
	(mg kg ⁻¹ solo)	
T1	0	0
T2	0	12
T3	300	0
T4	300	6
T5	300	12
T6	300	18

As parcelas experimentais constituíram-se de frascos de vidro com capacidade de 200 ml, onde se incubou o solo (50 g) por sete períodos: 0, 7, 15, 30, 45, 60, e 90 dias, em laboratório com temperatura média diária de 26°C. A vantagem da incubação em pequenos frascos é que o processo de extração das formas solúveis de N do solo e posterior determinação não depende de homogeneização e subamostragens, o que permite a redução do erro experimental. Os tratamentos foram incorporados ao solo, para evitar perdas de N por volatilização de NH₃.

Antes da aplicação dos tratamentos, os solos foram incubados com água (cerca de 60% de sua capacidade máxima de retenção) por 10 dias para recompor e ativar a flora microbiana. Durante todo o experimento essa umidade foi mantida, uma vez que os frascos permaneceram fechados com uma membrana semipermeável (Parafilm®), para reduzir a perda de água por evaporação. Pesagens periódicas dos vidros foram realizadas e água destilada foi adicionada para repor a umidade quando necessário.

Após a incubação por diferentes períodos, o solo foi analisado para pH, N-amídico, N-amoniacal e N-nítrico, para permitir acompanhar as transformações das diferentes formas de N no solo. Para tal, os frascos receberam 125 mL de uma solução diluída (20 mg L⁻¹) de acetato de fenil mercúrio (AFM), composto que inibe a ação da enzima urease, e foram agitados por 5 minutos. Em seguida, leu-se o pH da suspensão com um eletrodo de vidro.

Posteriormente, todo o conteúdo dos frascos foi transferido para um frasco com capacidade para 500 mL ao qual foram acrescentados 125 mL de uma solução 4 mol L⁻¹ de KCl, resultando em uma solução 2 mol L⁻¹ de KCl. A mistura foi agitada por 1 hora e alíquotas do sobrenadante foram tomadas para a determinação do N-nítrico e N-amoniacal, pelo método da destilação a vapor (CANTARELLA & TRIVELIN, 2001) e, do N-uréia, pelo método da diacetil monoxima (MULVANEY & BREMNER, 1979).

Com os resultados analíticos de N-inorgânico no solo nas diferentes épocas de incubação, calculou-se um índice para avaliar a eficiência de DCD como inibidor de nitrificação (%IN):

$$\%IN = \left(\frac{Nitrato_{UR} - Nitrato_{UR+DCD}}{Nitrato_{UR}} \right) \times 100, \text{ onde:}$$

$Nitrato_{UR}$ e $Nitrato_{UR+DCD}$ são as quantidades em mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ de solo, nos tratamentos com uréia e com uréia + dicianodiamida, respectivamente, produzidas após os intervalos de incubação. A concentração de N-NO₃⁻ após cada intervalo de incubação foi obtida subtraindo-se a concentração de N-NO₃⁻ existente na amostra correspondente, antes da incubação.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias dentro de cada época comparadas pelo teste T (LSD) a 1 e 5 % de probabilidade, com uso do Programa Sisvar (FERREIRA, 2000). O erro experimental associado aos tratamentos também foi apresentado por meio do desvio padrão das médias.

3.2. Resposta do milho e eficiência de uso do N do fertilizante em função da aplicação de uréia tratada com DCD

Foram desenvolvidos dois experimentos iguais e simultâneos dentro do Estado de São Paulo no ano agrícola de 2007/2008, sendo um em Assis (latitude: 22°47'S; longitude: 50°26'W; altitude: 560 m) e outro em Votuporanga (latitude: 20°25' S; longitude: 49°59'W; altitude: 505 m), envolvendo diferentes manejos de adubação nitrogenada com uréia e DCD no cultivo de milho em sistema plantio direto, com o objetivo de avaliar a resposta da cultura do milho à adição de DCD aos fertilizantes nitrogenados.

Nesses dois municípios, foram escolhidas áreas que dispusessem de solos com textura arenosa, nos quais a lixiviação de nitrato geralmente é mais intensa e o efeito do inibidor pode ser mais bem avaliado.

Em Assis, o experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho distrófico, de textura arenosa (EMBRAPA 2006), em área do Pólo Regional Médio Paranapanema da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA).

Em Votuporanga, o experimento foi conduzido em um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico latossólico de textura arenosa (EMBRAPA 2006), em área do Pólo Regional Noroeste Paulista da APTA.

Antes da implantação dos experimentos, foram retiradas amostras compostas de solo nas áreas, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm para caracterização química (RAIJ et al. 2001) e física (CAMARGO et al., 1986); os resultados das análises do solo de Assis estão descritos nas Tabelas 4 e 5 e os do solo de Votuporanga estão nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Em Assis, em 18/09/2007, cerca de um mês antes da amostragem do solo para caracterização química, foi realizada calagem na área com 2 t ha⁻¹ de calcário, suficiente para elevar a saturação por bases para 70%.

Tabela 4 - Caracterização química inicial do solo utilizado para experimentação em Assis (SP).

Profundidade	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	S.B.	C.T.C.	V%	B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³				
00-20	4,6	18	55	1,8	13	2	25	17	42	40	0,16	0,3	41	3,5	2,6
20-40	4,2	12	10	1,0	8	2	22	11	34	33	0,20	0,2	17	1,1	0,9
40-60	4,2	11	3	0,8	6	2	22	9	31	28	0,16	0,1	10	0,4	0,5

Tabela 5 - Caracterização física inicial do solo utilizado para experimentação em Assis (SP).

Profundidade	Argila (< 0,002 mm)	Silte (0,053 - 0,002 mm)	Areia total (2,00 - 0,053 mm)	Classificação textural
cm	g kg ⁻¹			
00-20	113	37	851	Areia-franca
20-40	138	56	807	Franco-arenosa
40-60	138	64	798	Franco-arenosa

Tabela 6 - Caracterização química inicial do solo utilizado para experimentação em Votuporanga (SP).

Profundidade	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	S.B.	C.T.C.	V%	B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----						%	----- mg dm ⁻³ -----				
00-20	5,5	13	17	2,3	16	5	13	23	37	64	0,15	0,3	13	19,7	1,2
20-40	5,7	10	6	1,1	18	6	12	25	37	68	0,17	0,3	7	10	0,3
40-60	5,7	9	3	0,9	13	5	12	19	31	61	0,11	0,2	5	6,5	< 0,1

Tabela 7 - Caracterização física inicial do solo utilizado para experimentação em Votuporanga (SP).

Profundidade	Argila (< 0,002 mm)	Silte (0,053 - 0,002 mm)	Areia total (2,00 - 0,053 mm)	Classificação textural
cm	----- g kg ⁻¹ -----			
00-20	125	29	846	Areia-franca
20-40	125	61	814	Franco-arenosa
40-60	150	51	799	Franco-arenosa

Além de se optar por instalar os experimentos em solos arenosos, buscou-se também, solos com histórico de cultivo de gramíneas no sistema plantio direto, para aumentar o potencial de resposta aos tratamentos com N.

Em Assis, as culturas anteriores foram aveia-preta no inverno 2007 e milho no verão 2006, mas havia pouca cobertura vegetal na superfície. Não foi possível semear milheto para aumentar essa cobertura, pois devido à previsão de semear o milho em outubro, essa operação não seria viável. A massa de matéria seca de cobertura vegetal avaliada na época foi de $0,92 \text{ t ha}^{-1}$. No dia 23 de outubro foi a semeadura mecânica do milho, híbrido simples/precoce Dow 2B587, com espaçamento de 0,8m entre linhas e população de $62.500 \text{ plantas ha}^{-1}$. Foi realizada adubação de semeadura em todas as parcelas com 350kg da formulação 08-28-16, fornecendo aproximadamente 30 kg N ha^{-1} .

Em Votuporanga, as culturas anteriores foram sorgo no inverno 2007 e milho no verão 2006, e também havia pouca cobertura vegetal na superfície. Nesse caso, como a previsão de semeadura do milho era apenas para dezembro, optou-se por semear milheto para aumentar a quantidade de cobertura vegetal. Essa operação foi realizada no final de setembro, mas devido às baixas precipitações pluviárias ocorridas na época, o desenvolvimento da cultura não foi bom. O milheto foi dessecado no início de dezembro, e a massa de matéria seca de cobertura vegetal avaliada na época foi de $1,39 \text{ t ha}^{-1}$. No dia 13 do mesmo mês ocorreu a semeadura do milho, seguindo os mesmos procedimentos e mesmo híbrido empregados em Assis.

Nos dois locais, os tratamentos culturais e fitossanitários referentes aos manejos das culturas foram feitos com tecnologias apropriadas a cada região.

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com cinco repetições e 14 tratamentos; as parcelas experimentais foram constituídas por 4 linhas de milho, espaçadas a 0,80m, com 10 metros de comprimento, tendo portanto 32 m^2 .

Os tratamentos (Tabela 8) envolveram doses e épocas de aplicação de N. As três épocas de aplicações dos tratamentos foram: todo o N na semeadura (S); adubação em cobertura em uma aplicação, quando o milho estava com 4 folhas completamente desenvolvidas (4F); e adubação em cobertura parcelada em duas aplicações, quando o milho estava com 4 e com 8 folhas completamente desenvolvidas (4F+8F). A adubação com 30 kg ha^{-1} de N na semeadura, comum a todas as parcelas, não foi computada nos tratamentos apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Relação dos tratamentos empregados nos experimentos de Assis e de Votuporanga.

N.º	Código para os tratamentos ⁽¹⁾	Dose de N (kg ha ⁻¹) ⁽⁶⁾	Fonte de N	Épocas de Aplicação
1	Testemunha	0	-	-
2	UR-60 (S)	60	UR ⁽²⁾	Semeadura
3	UR-60 (4F)	60	UR	4 Folhas ⁽⁴⁾
4	UR-60 (4F+8F)	60	UR	4 Folhas + 8 Folhas
5	UR-90 (S)	90	UR	Semeadura
6 ⁽⁵⁾	UR-90 (4F)	90	UR	4 Folhas
7	UR-90 (4F+8F)	90	UR	4 Folhas + 8 Folhas
8	UR-120 (S)	120	UR	Semeadura
9	UR-120 (4F)	120	UR	4 Folhas
10	UR-120 (4F+8F)	120	UR	4 Folhas + 8 Folhas
11	UR-90 + DCD (S)	90	90%N UR + 10%N DCD ⁽³⁾	Semeadura
12 ⁽⁵⁾	UR-90 + DCD (4F)	90	90%N UR + 10%N DCD	4 Folhas
13	UR-90 + DCD (4F+8F)	90	90%N UR + 10%N DCD	4 Folhas + 8 Folhas
14	UR-150 (4F+8F)	150	UR	4 Folhas + 8 Folhas

⁽¹⁾ Código para os tratamentos : UR = Uréia; 60, 90, 120 e 150 = doses de N (kg ha⁻¹);
S = Semeadura; 4F = 4 folhas; 4F+8F = 4 folhas + 8 folhas;
DCD = Dicianodiamida

⁽²⁾ UR = Uréia (450 g N kg⁻¹)

⁽³⁾ DCD = Dicianodiamida (650 g N kg⁻¹)

⁽⁴⁾ Folhas = número de folhas totalmente desenvolvidas na cultura do milho

⁽⁵⁾ Tratamentos que no experimento de Votuporanga tiveram microparcels extras, com aplicação de uréia marcada com o isótopo estável ¹⁵N a uma taxa de 5%

⁽⁶⁾ Doses suplementares à adubação básica de semeadura do milho (30 kg N ha⁻¹)

Nestes experimentos, além de três doses de uréia interagindo com três épocas de aplicação, onde em uma das doses se avaliou a eficiência da adição de DCD, houve a inclusão de uma testemunha, sem adição de N e um tratamento adicional, com 150 kg N ha⁻¹ na forma de uréia, aplicado parceladamente, para aumentar os pontos da curva de resposta do milho. Na elaboração dos tratamentos, foi considerado que a uréia fertilizante e dicianodiamida continham respectivamente 45% e 65% de N.

A uréia foi incorporada ao solo para evitar perdas de NH₃ por volatilização. Mesmo nas adubações em cobertura, os fertilizantes foram incorporados. A quantidade de fertilizante de cada parcela foi calculada por linha, e armazenada em sacos plásticos até o dia da aplicação, que foi feita manualmente, em sulcos rasos abertos à 20 cm da linha da cultura. Nesta fase houve uma perfeita homogeneização da uréia com o inibidor, para evitar que ocorresse segregação física, que diminuiria a eficiência da adubação nitrogenada. Para isso, nos tratamentos 11, 12 e 13, a uréia foi macerada, de forma que ficasse fisicamente semelhante ao inibidor. A DCD utilizada foi grau reagente analítico fornecida pela Sigma-Aldrich.

Em Votuporanga, foram instaladas microparcelas com aplicação de uréia marcada com o isótopo estável ^{15}N contendo 5,12% de átomos de ^{15}N , para permitir quantificar a absorção do N do fertilizante pelas plantas. As microparcelas consistiram de uma faixa de 2 metros de linha, localizada em uma das linhas centrais de cada parcela dos tratamentos 6 (90 kg N-UR ha^{-1} aplicados quando o milho estava com 4 folhas) e 9 (90 kg N ha^{-1} , sendo 90% N-UR e 10% N-DCD, aplicados quando o milho estava com 4 folhas). Dessa forma, o experimento em Votuporanga teve 10 microparcelas, considerando que foram dois tratamentos e cinco repetições (Tabela 8).

Em Assis realizou-se uma amostragem de solo na época do florescimento do milho para analisar o N-inorgânico ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) nas profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Com auxílio de um trado tipo holandês foram retiradas 10 amostras simples por parcela em cada profundidade que, depois de homogeneizadas, deram origem a uma amostra composta. As amostras foram coletadas, na faixa de solo adubada com N, acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em caixas de isopor com gelo para transporte até Campinas e congeladas até a data das análises, que foram realizadas pelo método da destilação a vapor de acordo com CANTARELLA & TRIVELIN (2001).

Analisando o solo da primeira amostragem em Assis, constatou-se que a quantidade de N recuperada no solo foi baixa, e tomou-se a decisão de fazer uma amostragem extra em Votuporanga; dessa forma, além da amostragem na época do florescimento, também se amostrou o solo quando o milho apresentava 12 folhas, na tentativa de aumentar a recuperação de N do solo. Para coleta e análise das amostras foram utilizados os mesmos procedimentos do experimento em Assis.

Amostras de folhas foram coletadas no período do florescimento do milho nos dois locais. Coletaram-se 12 folhas da base da espiga (RAIJ et al., 1996) por parcela, que foram acondicionadas em sacos de papel, identificadas e levadas ao laboratório. Separou-se para análise os terços centrais das folhas, que foram secados a 65°C em estufa com circulação forçada de ar e depois moídos em moinho do tipo Wiley. O material foi analisado para N-total e demais macro e micronutrientes, de acordo com BATAGLIA et al. (1983).

Na época do florescimento em Votuporanga foram coletadas quatro folhas também nas microparcelas. As folhas foram moídas sem se desprezar os dois terços das extremidades e analisadas para ^{15}N por espectrometria de massa (HAUCK, 1982), no

Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP) em Piracicaba.

Ao fim do experimento, as duas linhas centrais das parcelas de milho foram colhidas manualmente, descartando-se 1 metro em cada extremidade; em Assis, a colheita ocorreu no dia 13/03/2008, após 139 dias da emergência, quando o milho apresentava em média 22% umidade e 1840 graus dia acumulados. Em Votuporanga a colheita foi feita no dia 08/04/2008, após 114 dias da emergência, quando apresentava em média 25% de umidade e 1695 graus dias acumulados. O rendimento de grãos dos dois locais foi ajustado para umidade de 13%.

O cálculo de graus-dia, ou unidades térmicas, foi realizado de acordo com as expressões (GADIOLI et al., 2000):

$$GD = \sum_{dc}^{de} \left(\frac{T_{máx.} + T_{mín.}}{2} \right) - T_b \quad (\text{se } T_m > T_{máx.} \text{ e } T_{mín.} > T_b)$$

$$GD = \sum_{dc}^{de} \left(\frac{T_m + T_{mín.}}{2} \right) - T_b \quad (\text{se } T_{máx.} > T_m \text{ e } T_{mín.} > T_b)$$

onde:

G.D = graus-dia

de = data da emergência

dc = data da colheita

T máx = temperatura máxima diária do ar (°C)

T mín = temperatura mínima diária do ar (°C)

T_b = temperatura basal inferior (10 °C)

T_m = temperatura basal superior (30 °C)

Para a colheita das microparcels, tomou-se toda a parte aérea das plantas de milho, 5 cm acima do solo, no metro central das mesmas. Esse procedimento também foi realizado nas linhas laterais à esquerda e à direita, para posteriormente avaliar a absorção de N do fertilizante pelas plantas dessas linhas. As plantas foram divididas em folha seca, colmo, sabugo e grãos, os quais foram secados a 65°C em estufa com circulação forçada de ar, pesados, desintegrados e moídos em triturador de palha e grãos, e depois moídos novamente em moinho do tipo Wiley. As amostras foram

enviadas ao Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP) em Piracicaba, para determinação da porcentagem de átomos de ^{15}N do material vegetal pelo procedimento descrito para as folhas.

Os resultados foram submetidos à análise de variância por meio do Programa Sisvar (FERREIRA, 2000). As médias para teores de N no solo, teores de N foliar e rendimento de grãos de tratamentos pré-estabelecidos foram comparadas pelo teste F através de contrastes ortogonais a 1 e 5% de probabilidade; as médias para os dados com ^{15}N foram comparadas pelo teste T (LSD) a 1 e 5% de probabilidade; os teores de N foliar e o rendimento de grãos também foram submetidos a análises de regressão, para avaliar a resposta do milho às doses de N.

O clima dos dois locais foi caracterizado com base nos dados obtidos em estações meteorológicas convencionais do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), que em ambos os casos estavam localizadas em áreas próximas aos experimentos.

Além dos balanços hídricos seqüenciais e da capacidade de armazenamento de água no solo decendiais, calculadas segundo o método proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955), utilizando-se planilha eletrônica desenvolvida por ROLIM et al. (1998), também foram computados os dados diários de precipitação pluvial e temperatura média do ar nos diferentes estádios fisiológicos do milho.

Em Assis a caracterização foi feita entre os meses de outubro de 2007 a março de 2008 (Figura 1), e em Votuporanga de dezembro de 2007 a abril de 2008 (Figura 2), períodos em que o milho foi cultivado em cada local.

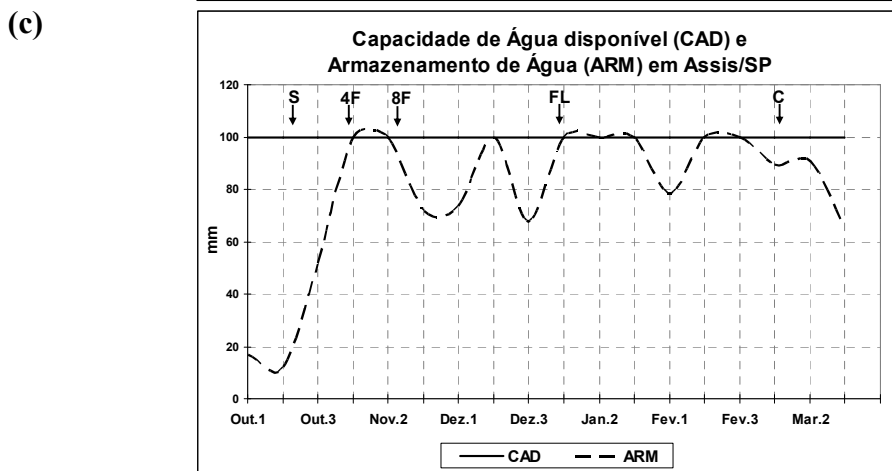
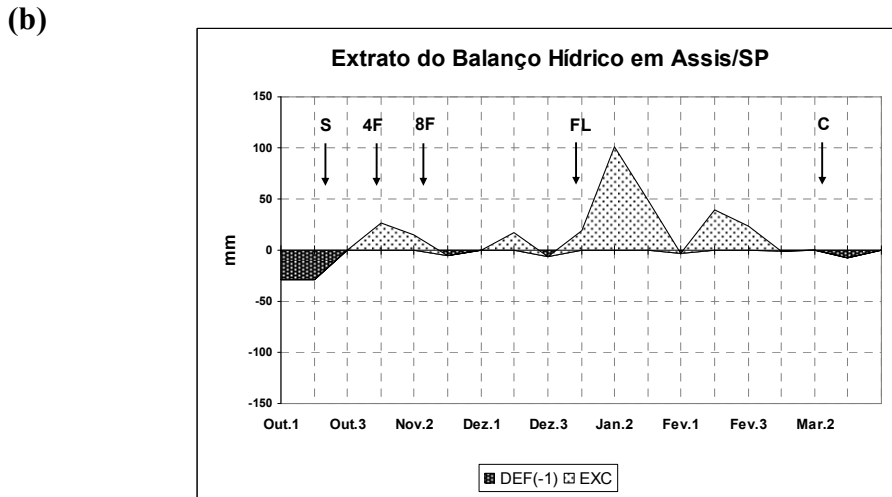
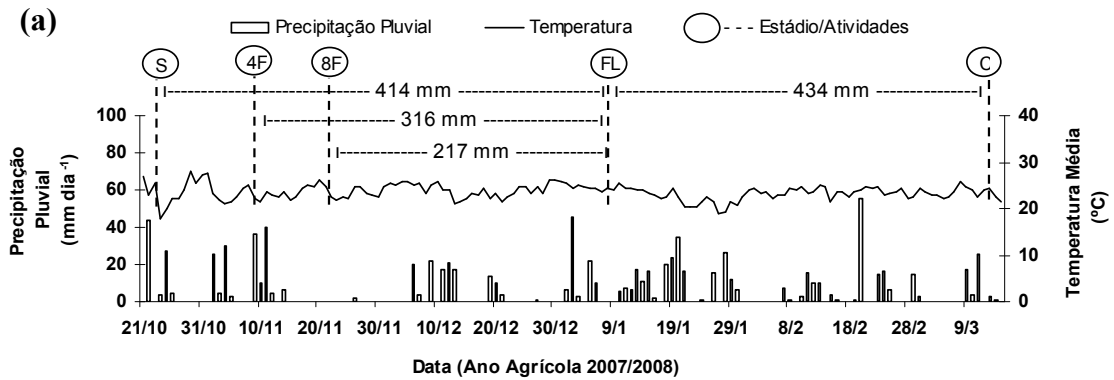


Figura 1 – Caracterização climática de Assis (SP) entre meses de outubro de 2007 e março de 2008: **(a)** Precipitação pluvial e temperatura média diárias (com as somatórias parciais de precipitação pluvial evidenciadas entre as linhas pontilhadas) e representação dos estádios fenológicos do milho em que foram realizadas adubações e amostragens (S = Semeadura [23/10], 4F = 4 Folhas [09/11], 8F = 8 Folhas [23/11], FL= Florescimento [09/01], C = Colheita [13/03]); **(b)** Extrato do balanço hídrico climatológico decenal, onde valores positivos indicam excedente hídrico e negativos deficiência hídrica, considerando-se a capacidade de água disponível de 100 mm e **(c)** Variação decenal do armazenamento de água no solo. Dados obtidos a partir de estação meteorológica (CIAGRO/IAC) localizada próxima ao campo experimental.

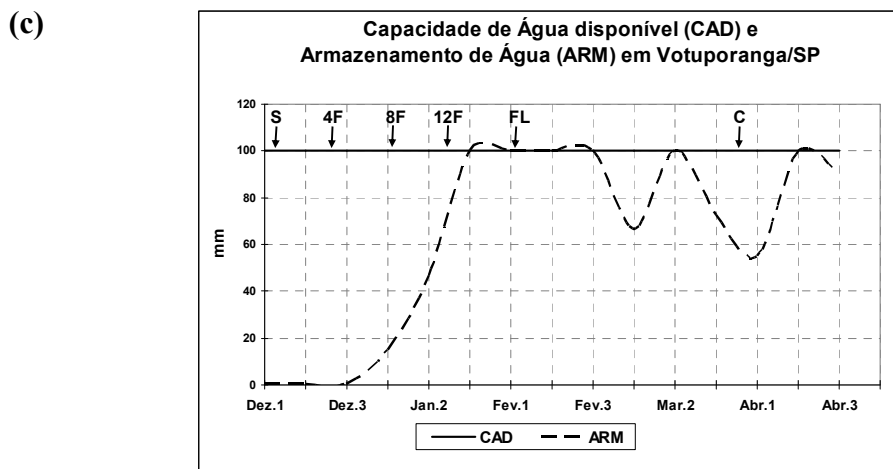
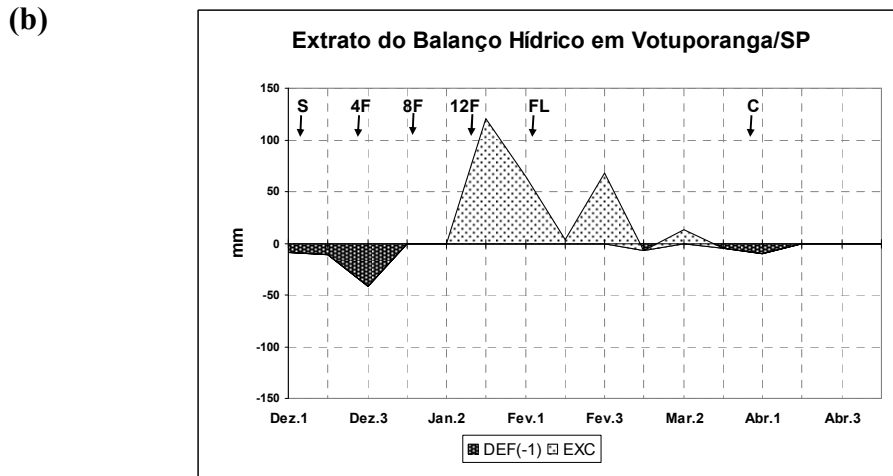
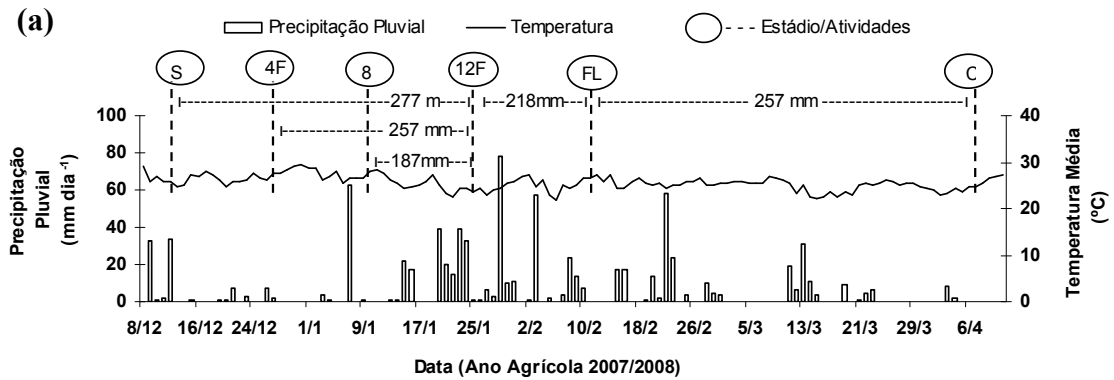


Figura 2 – Caracterização climática de Votuporanga (SP) entre meses de dezembro de 2007 e abril de 2008: **(a)** Precipitação pluvial e temperatura média diárias (com as somatórias parciais de precipitação pluvial evidenciadas entre as linhas pontilhadas) e representação dos estádios fenológicos do milho em que foram realizadas adubações e amostragens (S = Semeadura [13/12], 4F = 4 Folhas [27/12], 8F = 8 Folhas [11/01], 12F = 12 Folhas [25/01], FL = Florescimento [12/02], C = Colheita [08/04]); **(b)** Extrato do balanço hídrico climatológico decendial, onde valores positivos indicam excedente hídrico e negativos deficiência hídrica, considerando-se a capacidade de água disponível de 100 mm e **(c)** Variação decendial do armazenamento de água no solo. Dados obtidos a partir de estação meteorológica (CIIAGRO/IAC) localizada próxima ao campo experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Eficiência de DCD como inibidor de nitrificação quando associado à uréia

O uso de DCD fez com que o NH_4^+ proveniente da hidrólise da uréia se mantivesse por mais tempo no solo, ao mesmo tempo em que retardou a formação de NO_3^- (Figuras 3, 4 e 5).

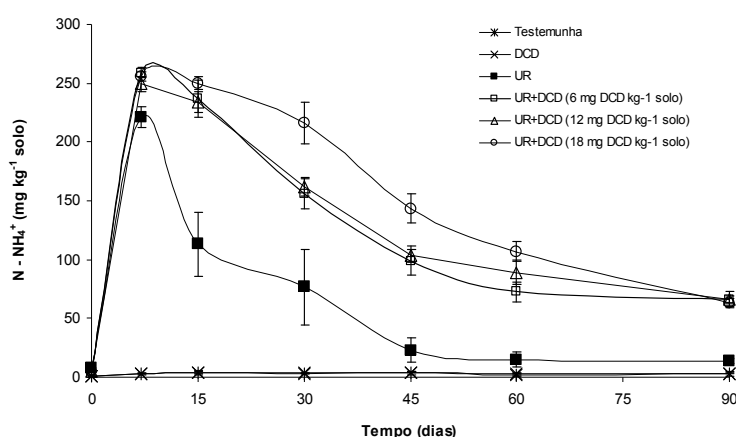


Figura 3 - Concentrações de NH_4^+ no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg^{-1} solo), UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg^{-1} solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias.

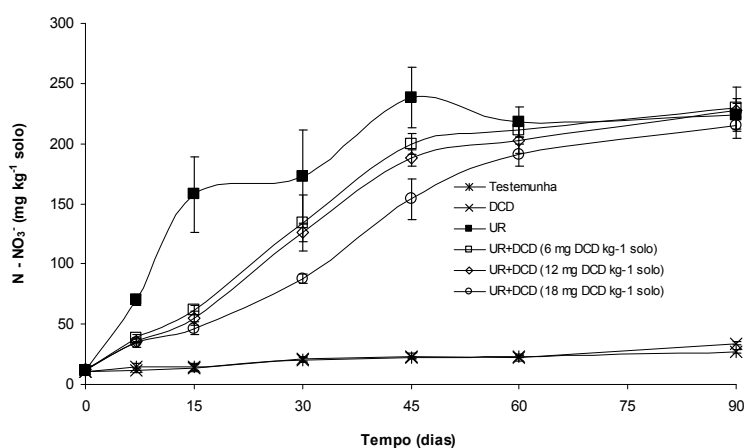


Figura 4 - Concentrações de NO_3^- no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg^{-1} solo), UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg^{-1} solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias.

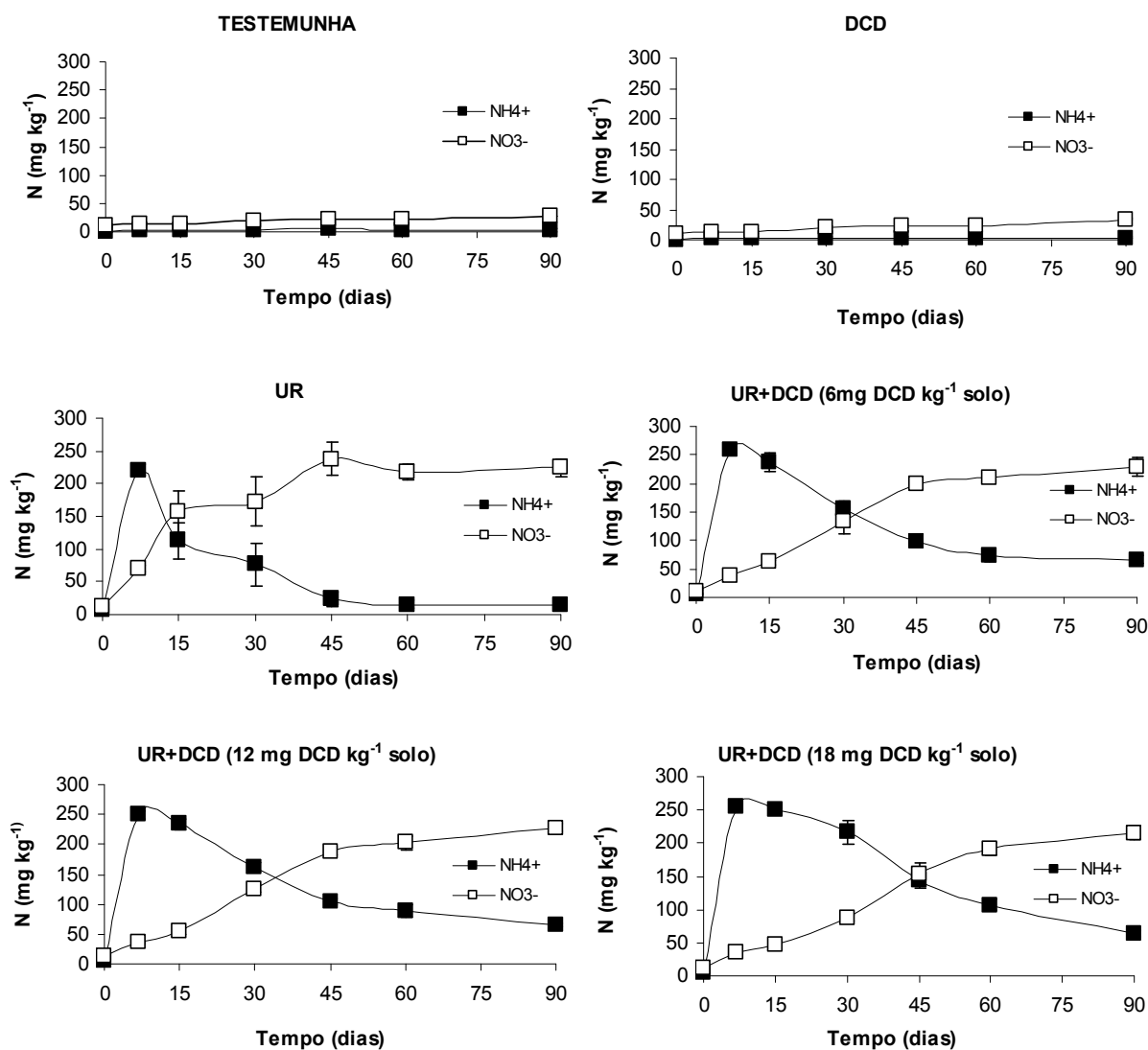


Figura 5 - Concentrações de NH₄⁺ e NO₃⁻ no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg⁻¹ solo), UR (300 mg N kg⁻¹ solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg⁻¹ solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg⁻¹ solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias.

Na segunda época de incubação, aos 7 dias, não foi mais encontrada uréia remanescente no solo em nenhum dos tratamentos. A hidrólise da uréia liberou grandes quantidades de NH₄⁺ e elevou o pH do solo em todos os tratamentos que receberam o fertilizante (Figura 6). OVERREIN & MOE (1967) notaram que o pH do solo ao redor das partículas de uréia-fertilizante subiu de 6,5 para 8,8 três dias após a adubação. Resultados semelhantes foram observados por outros pesquisadores em diferentes tipos de solo (KISSEL et al., 1988).

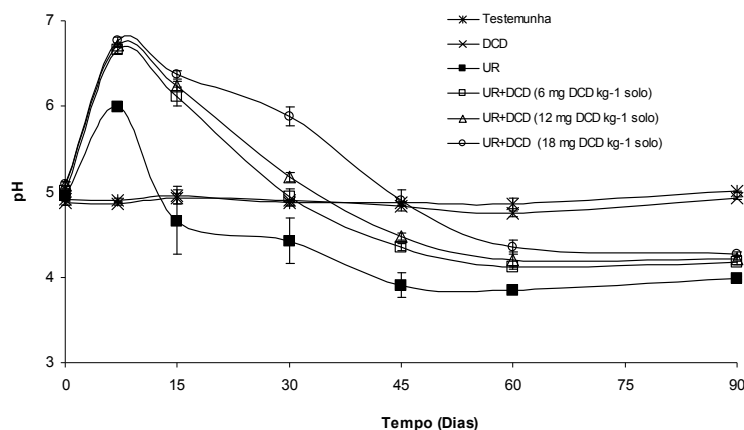


Figura 6 - Valores de pH no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg⁻¹ solo), UR (300 mg N kg⁻¹ solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg⁻¹ solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg⁻¹ solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias.

O tratamento com apenas uréia proporcionou valores menores de pH (Figura 6) e NH₄⁺ (Figura 3) e valor maior de NO₃⁻ (Figura 4) que os três tratamentos que receberam uréia + DCD (T4, T5 e T6), indicando que o processo de nitrificação já havia se iniciado e, apesar de ainda lento, era mais intenso onde não se aplicou DCD. Dos três tratamentos com DCD, aquele com 18 mg DCD kg⁻¹ solo foi o que proporcionou os maiores valores de pH ao longo das épocas de incubação. O tratamento 1 (testemunha) e 2 (12 mg DCD kg⁻¹ solo) tiveram comportamento ao longo do tempo semelhante, com o pH se mantendo praticamente inalterados.

Conforme relata CANTARELLA (2007), a reação de nitrificação libera no solo íons de hidrogênio, que acidificam o solo. Por isso o maior pH encontrado nos tratamentos com DCD é um indício de que ele inibiu a nitrificação. ZAMAN et al. (2008) compararam aplicação de uréia, com uréia + NBPT (inibidor de urease) e uréia + NBPT + DCD, e também observaram que o tratamento com DCD foi o que proporcionou os maiores valores de pH ao longo das épocas de incubação.

Aos 15 dias, foi possível verificar a maior efetividade de DCD; o tratamento controle com apenas uréia, teve uma alta taxa de nitrificação, e os tratamentos com DCD retardaram a oxidação do amônio a nitrato em até 76% (Tabela 9).

Tabela 9 - Quantidade total de N-inorgânico recuperada do fertilizante, porcentagem de N - NH_4^+ e porcentagem de inibição da nitrificação dentro de cada época, em função da aplicação dos tratamentos: testemunha (0 mg N), DCD (12 mg DCD kg^{-1} solo), UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD (300 mg N-UR kg^{-1} solo acrescido de 6, 12 ou 18 mg DCD kg^{-1} solo). Médias das quantidades de N recuperadas comparadas pelo teste T (LSD).

Tratamentos	Épocas de avaliação, dias					
	7	15	30	45	60	90
	----- mg N (NH_4^+ + NO_3^-) kg^{-1} de solo -----					
UR	280 a b	260 a	238 a	250 a	222 a	227 a
UR + 6mg DCD kg^{-1} solo	286 b	288 b	279 b	288 b	273 b	285 b
UR+ 12mg DCD kg^{-1} solo	274 a	278 a b	277 b	280 b	281 b	283 b
UR+ 18mg DCD kg^{-1} solo	279 b	285 b	292 b	286 b	287 b	267 b
CV (%)	2,0	4,6	5,2	3,5	4,4	4,8
DMS	9,0	20,6	22,6	15,6	18,5	20,4
	----- % de N como NH_4^+ -----					
UR	79	43	32	9	7	6
UR + 6mg DCD kg^{-1} solo	90	82	56	34	26	23
UR+ 12mg DCD kg^{-1} solo	91	84	58	37	32	23
UR+ 18mg DCD kg^{-1} solo	91	87	74	50	37	23
	----- % de inibição da nitrificação -----					
UR + 6mg DCD kg^{-1} solo	53	65	24	17	3	1,7
UR+ 12mg DCD kg^{-1} solo	58	70	29	22	7	0,6
UR+ 18mg DCD kg^{-1} solo	60	76	53	37	13	4,2

⁽¹⁾ Médias na coluna seguidas da mesma letra não se diferenciam estatisticamente (Teste T /LSD - 5%)

Nas avaliações realizadas, a porcentagem de N na forma de NH_4^+ foi sempre maior nos solos que receberam os tratamentos com DCD do que no solo que recebeu o tratamento com UR (Tabela 9).

O teor de NO_3^- , geralmente foi maior no tratamento que recebeu apenas uréia, porém, isso nem sempre ocorreu (Figura 4). Como a taxa de nitrificação foi maior nesse tratamento, é provável que parte da grande quantidade de nitrato formada tenha se perdido por desnitrificação. A quantidade de água adicionada às parcelas foi calculada de forma que o ambiente fosse aeróbico; porém pode ter havido sítios anaeróbicos isolados no solo que concentraram maior umidade, e possibilitaram esse processo (CANTARELLA, 2007). A desnitrificação também é a provável causa de um pequeno acréscimo nos valores de pH, na última época.

A quantidade de N- $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)$ proveniente da uréia que foi recuperada nas análises a partir do 30º dia de incubação foi expressivamente menor no tratamento 3 (apenas uréia) do que nos demais tratamentos que tiveram adição de DCD, o que pode ser mais um indício de ter havido perdas de N por desnitrificação após a liberação de grande quantidade de nitrato nesse tratamento (Tabela 9).

BRONSON et al. (1989), avaliando a eficiência de DCD, creditaram menores recuperações de N-inorgânico aos processos de imobilização e volatilização de NH_3 ; este último provavelmente não ocorreu neste experimento, pois a uréia foi incorporada ao solo.

O tratamento com a dose máxima de DCD (UR + 18 mg DCD kg^{-1} solo) foi o que apresentou os melhores resultados no controle da nitrificação. Assim como os demais tratamentos com UR + DCD, ele teve sua eficiência diminuída ao longo do tempo, porém, aos 30 dias, ele ainda proporcionava uma taxa de inibição de 53% (Tabela 9).

Os demais tratamentos com DCD tiveram comportamento semelhante ao longo das épocas de incubação, proporcionando para o tratamento com uréia + 6 mg DCD kg^{-1} solo, eficiência de inibição de nitrificação de 24% e para o tratamento com uréia + 12 mg DCD, eficiência de inibição de nitrificação de 29%, aos 30 dias de incubação sob temperatura de 26°C.

PUTTANNA et al. (1999), também em condições de laboratório, constataram que o uso de 10 mg DCD kg^{-1} solo proporcionou eficiência de inibição da nitrificação de 42% aos 30 dias de incubação, sob uma temperatura de 30°C. Esse índice é superior aos encontrado no presente estudo em doses semelhantes; é possível que o solo arenoso

usado por PUTTANNA et al. (1999), tenha possibilitado essa maior eficiência do inibidor, visto que ele é mais rapidamente degradado em solos argilosos (MCCARTY & BREMNER, 1989), como foi o solo utilizado nesse estudo.

Acredita-se que após a época de 60 dias, tenha faltado oxigênio nos frascos com o solo incubado, o que pode ter levado a uma redução da nitrificação. Isso não comprometeu o estudo, pois observa-se que com 60 dias, praticamente todo o NH_4^+ proveniente do solo que recebeu o tratamento 3 (UR) já tinha sido nitrificado, antes da possível falta de O_2 . Entretanto, os demais tratamentos com uréia e DCD ainda possuíam quantidades consideráveis de amônio, que não foram convertidas em nitrato mesmo na época de 90 dias (Figura 3).

MCCARTY & BREMNER (1989) também estudaram o comportamento de DCD por meio de incubações em laboratório. Diversos experimentos foram realizados; em um deles, aos 21 dias de incubação com temperatura de 20°C , a DCD aplicada a 10 mg kg^{-1} de solo proporcionou índices de controle de nitrificação entre 73 e 85%, dependendo do tipo de solo. Esses valores são coerentes com os encontrados nesse trabalho.

No presente estudo, quando se utilizou apenas uréia, o teor de nitrato era igual ao teor de amônio já na terceira avaliação, aos 15 dias. Com o tratamento com a máxima dose de DCD, esse fenômeno foi constatado apenas na quinta avaliação, aos 45 dias (Figura 7).

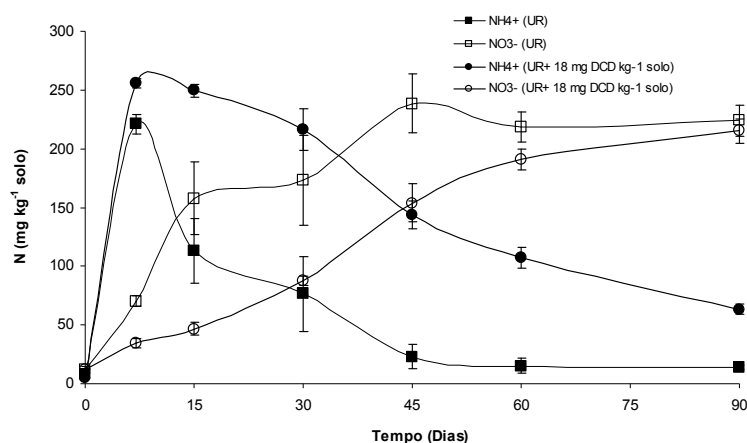


Figura 7 - Concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no solo em diferentes períodos de incubação em laboratório, em função da aplicação dos tratamentos: UR (300 mg N kg^{-1} solo) e UR + DCD ($300 \text{ mg N-UR kg}^{-1}$ solo acrescido de $18 \text{ mg DCD kg}^{-1}$ solo). As barras verticais representam os desvios padrões das médias.

Para os tratamentos 1 (Testemunha) e 2 (12 mg DCD kg⁻¹ solo) houve comportamento semelhante nas variáveis analisadas (Figuras 3, 4 e 6); o uso de apenas DCD não foi eficiente em retardar a nitrificação do N-amoniaco proveniente da matéria orgânica do solo.

De forma geral, observa-se que os três tratamentos que envolveram aplicação de uréia e DCD tiveram capacidade de controlar as taxas de nitrificação. O tratamento 6 (UR + 18 mg DCD kg⁻¹ solo) foi o que mais se destacou, proporcionando maior capacidade de inibição da nitrificação que os tratamentos 4 (UR + 6 mg DCD kg⁻¹ solo) e 5 (UR + 12 mg DCD kg⁻¹ solo), que tiveram comportamento semelhante para pH (Figura 6), NH₄⁺ (Figura 3) e NO₃⁻ (Figura 4).

Este estudo de laboratório mostrou que a dose de 18 mg DCD kg⁻¹ de solo, que nesse caso correspondeu a 3,75% do N do adubo na forma de N-DCD foi capaz de inibir a nitrificação em 53% aos 30 dias de incubação e proporcionar 50% do N do solo na forma de N-amônio, aos 45 dias de incubação (Tabela 9). Formulações comerciais como o ALZON 47, que é fabricado na Alemanha e contém 47% de N, dos quais 3% são N DCD (ULLMANN'S AGROCHEMICALS, 2009), permitem constatar que as porcentagens de N-DCD utilizadas neste trabalho estão dentro do que é utilizado comercialmente. As outras doses utilizadas nesse trabalho, 6mg DCD kg⁻¹ solo e 12 mg DCD kg⁻¹ solo corresponderam, respectivamente, à 1,28% e 2,53% do N do adubo na forma de N-DCD, também proporcionaram resultados satisfatórios, embora menos expressivos do que a dose de 18 mg DCD kg⁻¹ solo (Tabela 9).

Em sistemas agrícolas intensivos, onde se realizam notáveis adubações nitrogenadas em épocas chuvosas, como por exemplo, em áreas comerciais de milho, esse retardamento da nitrificação pode ser revertido em maior aporte de N ao sistema e, conseqüentemente, maior retorno econômico aos produtores. Por isso há necessidade de se fazer estudos até chegar na dose mais viável que proporcione uma inibição da nitrificação até o momento exigido para cada cultura, de forma que possam ser obtidos incrementos de produção.

4.2 Resposta do milho e eficiência de uso do N do fertilizante em função da aplicação de uréia tratada com DCD

4.2.1 N no solo

No experimento de Assis, a amostragem de solo foi feita apenas no florescimento e muito pouco N mineral foi recuperado nas análises, com teores de N- NH_4^+ e N- NO_3^- variando de 0 a $3,2 \text{ mg kg}^{-1}$ solo (Tabela 10). Nota-se que para a dose de $90 \text{ kg de N ha}^{-1}$, os tratamentos com DCD proporcionaram valores maiores de N- NH_4^+ que os tratamentos sem DCD nas três camadas de solo analisadas. Na camada de 0-20 cm, os tratamentos com DCD proporcionaram a média de $2,7 \text{ mg kg}^{-1}$ enquanto os tratamentos sem DCD a média de $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$; os valores correspondentes para a camada de 20-40 cm foram de $2,2 \text{ mg kg}^{-1}$ com DCD e $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$ sem DCD; na camada de 40-60 cm os tratamentos com DCD continham $2,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de N inorgânico, enquanto os tratamentos sem DCD $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 10). Isso é um indício de que a DCD retardou a nitrificação, porém as baixas quantidades de N encontradas tornam os resultados dessa análise pouco relevantes.

Supondo que o N na área amostrada represente o N na área total, calculou-se as quantidades de N inorgânico residual ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) total nos 60 cm de profundidade em 1 hectare. Dessa forma, os tratamentos com DCD novamente tiveram médias superiores aos tratamentos sem DCD. Os tratamentos com DCD proporcionaram média de 20 kg N ha^{-1} enquanto nos tratamentos sem DCD a média foi de 6 kg N ha^{-1} (Tabela 10). Entretanto, como a adubação foi feita em faixas e não em área total, os valores de N assim expressos devem estar superestimados.

A realização das adubações em cobertura não influenciou nas quantidades de N-inorgânico encontradas no solo na época do florescimento (Tabela 10).

Tabela 10 - Teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- ao longo do perfil do solo e quantidade total de N-inorgânico encontrada no solo amostrado na época do florescimento do milho no experimento de Assis (SP). Médias dos contrastes pré-definidos comparadas pelo teste F.

Fonte	Época ⁽¹⁾	Dose	Teores de N nas camadas						N inorgânico na camada 0-60 cm
			0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		
			N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	$\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$
		kg ha ⁻¹	----- mg N kg ⁻¹ solo -----						kg N ha ⁻¹
Testemunha	-	0	1,5	2,0	1,2	0,1	0,8	0,3	12
UR	S	90	1,3	1,3	0,5	0,2	0,1	0,0	7
	4F	90	0,0	1,5	0,3	0,0	0,1	0,4	5
	4F+8F	90	0,4	1,0	0,0	0,4	1,0	0,4	7
		150	3,2	3,2	2,9	1,8	2,8	1,7	31
UR+DCD	S	90	2,0	1,0	2,4	0,9	2,2	1,3	20
	4F	90	3,0	1,3	2,4	1,1	2,5	0,7	22
	4F+8F	90	3,0	1,1	1,8	0,6	2,1	1,1	20

Contraste⁽²⁾ / Tratamentos

1. Época de aplicação de N: S x (4F, 4F+8F)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Média S	1,7	1,2	1,5	0,6	1,2	0,7		13
Média (4F, 4F+8F)	1,6	1,2	1,1	0,5	1,4	0,7		13
2. Época de aplicação de N: 4F x 4F+8F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Média 4F	1,5	1,4	1,4	0,6	1,3	0,6		13
Média 4F+8F	1,7	1,1	0,9	0,5	1,6	0,8		13
3. Adição de DCD na uréia: UR x UR+DCD	**	ns	**	**	**	**	**	**
Média UR	0,6	1,3	0,3	0,2	0,4	0,3		6
Média UR+DCD	2,7	1,1	2,2	0,9	2,3	1,0		20

(1) S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas completamente expandidas)

(2) ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5% respectivamente.

Em Votuporanga, devido ao atraso no início das precipitações, o experimento foi instalado 51 dias após o experimento de Assis; nessa época, já havia sido realizada análise das amostras de solo do experimento. Então, optou-se por fazer uma amostragem de solo extra, na época em que o milho estava com 12F, período onde haveria maior possibilidade de encontrar N no solo em relação ao período do florescimento, visto que menor quantidade de N havia sido absorvida ou lixiviada até então.

Quantidades maiores de N-inorgânico foram recuperadas, mas ainda em baixas escalas, com teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- variando de 0 a $31,2 \text{ mg kg}^{-1}$ solo (Tabela 11). Foi possível observar que os tratamentos na dose de 90 kg N ha^{-1} com DCD proporcionaram valores maiores de N-NH_4^+ que os tratamentos sem DCD nos primeiros 20 cm de solo, que aparentemente é a camada que estava concentrada a maior parte do N aplicado. Nessa camada, os tratamentos com DCD proporcionaram a média de $14,9 \text{ mg kg}^{-1}$ enquanto os tratamentos sem DCD a média de $7,3 \text{ mg kg}^{-1}$. Quando se calculou a quantidade de N-inorgânico residual total nos 60 cm, também foi possível observar que o uso de DCD proporcionou a recuperação de maiores quantidades de N, pois os tratamentos com o inibidor tiveram média de 47 kg N ha^{-1} contra 31 kg N ha^{-1} sem o inibidor (Tabela 11).

Diferentemente de Assis, nessa amostragem extra, a realização de adubações em cobertura influenciou nas quantidades de N-inorgânico do solo. Na camada de 0-20 cm, maiores quantidades de nitrato e amônio foram encontradas nas adubações mais tardias. Assim, para o amônio, a média dos tratamentos aplicados na semeadura foi de 5 mg kg^{-1} e a dos tratamentos aplicados em 4F e em 4F+8F foi de $14,2 \text{ mg kg}^{-1}$; para o nitrato, a média dos tratamentos aplicados na semeadura foi de $2,1 \text{ mg kg}^{-1}$ e a dos tratamentos aplicados em 4F e em 4F+8F foi de $14,2 \text{ mg kg}^{-1}$. A cobertura parcelada em 4F+8F resultou em mais N do que a cobertura realizada com apenas 4F, sendo que para o amônio, a média dos tratamentos aplicados em 4F foi de $6,4 \text{ mg kg}^{-1}$ e em 4F+8F foi de $22,1 \text{ mg kg}^{-1}$, enquanto para o nitrato, a média dos tratamentos aplicados em 4F foi de $0,9 \text{ mg kg}^{-1}$ e em 4F+8F foi de $3,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 11).

Tabela 11 - Teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- ao longo do perfil do solo e quantidade total de N-inorgânico encontrada no solo amostrado na época em que o milho apresentava 12 folhas no experimento de Votuporanga (SP). Médias dos contrastes pré-definidos comparadas pelo teste F.

Fonte	Época ⁽¹⁾	Dose	Teores de N nas camadas						N inorgânico na camada 0-60 cm
			0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		
			N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	
		kg ha ⁻¹	----- mg N kg ⁻¹ solo -----						kg N ha ⁻¹
Testemunha	-	0	3,9	0,0	2,4	0,0	2,5	0,0	18
UR	S	90	3,6	0,3	3,3	0,0	3,0	0,0	20
	4F	90	5,5	0,6	3,2	0,1	2,9	0,2	25
	4F+8F	90	12,9	3,8	3,9	0,3	2,7	0,1	47
		150	30,1	7,1	6,4	2,0	4,2	2,3	104
UR+DCD	S	90	6,3	0,2	2,8	0,0	2,8	0,0	24
	4F	90	7,3	1,2	4,0	0,0	3,1	0,0	31
	4F+8F	90	31,2	2,9	4,2	0,0	4,4	0,4	86

Contraste⁽²⁾ / Tratamentos

1. Época de aplicação de N: S x (4F, 4F+8F)	**	**	*	ns	ns	ns	**
Média S	5,0	0,3	3,1	0,0	2,9	0,0	22
Média (4F, 4F+8F)	14,2	2,1	3,8	0,1	3,3	0,2	48
2. Época de aplicação de N: 4F x 4F+8F	**	**	ns	ns	*	ns	**
Média 4F	6,4	0,9	3,6	0,1	3,0	0,1	28
Média 4F+8F	22,1	3,4	4,1	0,2	3,6	0,3	67
3. Adição de DCD na uréia: UR x UR+DCD	**	ns	ns	ns	*	ns	**
Média UR	7,3	1,6	3,5	0,1	2,9	0,1	31
Média UR+DCD	14,9	1,4	3,7	0,0	3,4	0,1	47

(1) S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas completamente expandidas)

(2) ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5% respectivamente.

Na segunda amostragem de solo feita em Votuporanga, no florescimento, muito pouco N mineral foi recuperado nas análises, com teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- variando de 0,2 a 5,7 mg kg^{-1} solo (Tabela 12). Os dados indicam que na camada de 0-20 cm, a cobertura realizada em 4F+8F proporcionou maiores teores de N-NH_4^+ que a cobertura em apenas 4F (4F igual a 3,3 mg kg^{-1} e 4F+8F igual a 4,8 mg kg^{-1}). Os tratamentos com DCD proporcionaram menores teores de N-NH_4^+ que os tratamentos sem DCD nas três profundidades avaliadas (3,1 mg kg^{-1} contra 4,6 mg kg^{-1} de 0-20 cm, 2,8 mg kg^{-1} contra 4,2 mg kg^{-1} de 20-40 cm e 3,0 mg kg^{-1} contra 3,7 mg kg^{-1} de 40-60 cm) (Tabela 12).

Da mesma forma, os tratamentos com DCD apresentaram menos N residual que os tratamentos sem DCD ao longo dos 60 cm avaliados (24 kg N ha^{-1} com uréia + DCD e 31 kg N ha^{-1} com uréia sem DCD) (Tabela 12). Entretanto, na segunda amostragem de solo, as baixas quantidades de N recuperadas não tornam essas comparações relevantes, e admite-se que na época do florescimento o N aplicado já tinha sido absorvido, lixiviado ou imobilizado no solo.

Com exceção da primeira amostragem em Votuporanga, realizada quando o milho apresentava 12 folhas, as demais amostragens de solo realizadas nesses trabalhos, na época do florescimento, não tiveram altos teores de N-inorgânico. Na primeira amostragem de Votuporanga, foram encontrados teores de N-inorgânico semelhantes aos encontrados por CERETTA et al. (2002) e MAI et al. (2003), que trabalharam com épocas e doses de aplicação de nitrogênio na cultura do milho. Quando se parcelou a adubação em 4F + 8F, a soma dos teores de NH_4^+ e NO_3^- na camada de 0-20 cm foi de 34,1 mg N kg^{-1} solo (Tabela 11). Já nas outras duas amostragens, a somatória dos teores de NH_4^+ e NO_3^- na camada de 20 cm de solo, não excedeu 7 mg N kg^{-1} solo (Tabelas 10 e 12). É provável que nesses casos, os baixos teores de N encontrados sejam devidos ao fato da maior parte do N já ter sido absorvida na época do florescimento, ou ter sido lixiviada pela ocorrência de chuva (Figuras 1 e 2), que nestes solos arenosos podem carrear quantidades consideráveis de N para camadas inferiores.

Tabela 12 - Teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- ao longo do perfil do solo e quantidade total de N-inorgânico encontrada no solo amostrado na época do florescimento no experimento de Votuporanga (SP). Médias dos contrastes pré-definidos comparadas pelo teste F.

Fonte	Época ⁽¹⁾	Dose	Teores de N nas camadas						N inorgânico na camada
			0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		0-60 cm
			N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	$\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$
		kg ha ⁻¹	----- mg N kg ⁻¹ solo -----						kg N ha ⁻¹
Testemunha	-	0	5,7	1,3	4,1	0,2	3,9	0,4	31
UR	S	90	4,3	1,9	4,5	1,0	3,6	0,8	32
	4F	90	4,3	1,5	4,0	0,9	3,7	0,5	30
	4F+8F	90	5,3	0,8	4,0	0,9	3,9	0,6	31
		150	3,5	0,9	3,0	1,0	2,8	0,9	24
UR+DCD	S	90	2,8	1,2	2,1	0,9	2,5	1,0	21
	4F	90	2,3	1,3	2,9	1,2	2,8	1,0	23
	4F+8F	90	4,2	1,6	3,3	0,4	3,8	0,5	27

Contraste⁽²⁾ / Tratamentos

1. Época de aplicação de N: S x (4F, 4F+8F)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Média S	3,6	1,6	3,3	1,0	3,1	0,9		27
Média (4F, 4F+8F)	4,0	1,3	3,6	0,9	3,6	0,7		28
2. Época de aplicação de N: 4F x 4F+8F	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Média 4F	3,3	1,4	3,5	1,1	3,3	0,8		26
Média 4F+8F	4,8	1,2	3,7	0,7	3,9	0,6		29
3. Adição de DCD na uréia: UR x UR+DCD	**	ns	**	ns	*	ns	ns	**
Média UR	4,6	1,4	4,2	0,9	3,7	0,6		31
Média UR+DCD	3,1	1,4	2,8	0,8	3,0	0,8		24

(1) S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas completamente expandidas)

(2) ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5% respectivamente.

4.2.2 N Foliar

Em Votuporanga as aplicações de N em cobertura proporcionaram maiores teores de N foliar do que a aplicação na sementeira. A média dos tratamentos aplicados na sementeira foi de 28,3 g kg⁻¹ e a dos aplicados em 4F e em 4F+8F foi de 29,3 g kg⁻¹. Além disso, a cobertura realizada em 4F+8F resultou em ligeiro aumento no teor de N foliar em relação à cobertura realizada em 4F, sendo que a média dos tratamentos aplicados em 4F foi de 28,3 g kg⁻¹ e a dos aplicados em 4F+8F foi de 30,2 g kg⁻¹ (Tabelas 13 e 14).

O uso de DCD não elevou a concentração de N foliar, embora houvesse indícios de que ele tenha proporcionado maior teor de N no solo. As médias dos tratamentos e as médias dos contrastes estão contidas, respectivamente, nas Tabelas 13 e 14.

Apesar de não ter elevado os teores de N foliar, dados de microparcels com ¹⁵N permitem constatar que na época do florescimento, a DCD proporcionou maior porcentagem de N na planta derivada do fertilizante do que a uréia (39,9 % com uréia e DCD e 31,0 % com uréia sem DCD) (Tabela 15).

Em Assis, as adubações de N em cobertura também elevaram os teores de N foliar em relação à aplicação na sementeira (28,6 g kg⁻¹ na sementeira contra 30,7 g kg⁻¹ em 4F e em 4F+8F). Porém, a cobertura em 4F+8F não foi suficiente para aumentar o teor de N foliar em relação à cobertura em 4F (Tabelas 16 e 17).

Da mesma forma que em Votuporanga, o uso de DCD não elevou a concentração de N foliar (Tabelas 16 e 17).

Nesse experimento, como não foi feito uso de técnicas isotópicas, não foi possível determinar se houve maiores teores de N do fertilizante na planta proveniente dos tratamentos com DCD.

Tanto as plantas cultivadas em Assis como em Votuporanga foram afetadas positivamente pelas doses de N aplicadas nas três épocas de adubação. As regressões contidas nas figuras 8 e 9 incluem a dose de 30 kg ha⁻¹ de N, comum a todos os tratamentos.

Tabela 13 - Teor de nitrogênio nas folhas de milho amostradas na época do florescimento, em função das épocas de aplicação, doses de N e uso de DCD na cultura do milho – Votuporanga (SP).

Fonte	Época	Dose	N foliar
		kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹
Testemunha	-	0	21,0
UR	S	60	28,2
		90	26,2
		120	30,4
	4F	60	25,9
		90	29,3
		120	29,6
	4F+8F	60	28,7
		90	30,4
		120	31,6
150		34,3	
UR+DCD	S	90	28,5
	4F	90	29,4
	4F+8F	90	29,6

⁽¹⁾ S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas expandidas)

Tabela 14 - Análise estatística das médias de N foliar por meio do Teste F e contrastes pré-definidos – Votuporanga (SP).

Contraste / Atributo Comparado ⁽¹⁾	N Foliar	Probabilidade de F ⁽²⁾
	g kg ⁻¹	
1. Regressão para doses de N-UR em cobertura		
0 a 150 kg N ha ⁻¹ : Efeito quadrático ⁽³⁾	-	**
2. Época de aplicação de UR (Semeadura x Cobertura)		
Média S	28,3	*
Média (4F, 4F+8F)	29,3	
3. Época de aplicação de UR (Cobertura)		
Média 4F	28,3	**
Média 4F+8F	30,2	
4. UR com x sem DCD (N=90 kg ha ⁻¹)		
Média UR	28,6	ns
Média UR+DCD	29,2	

⁽¹⁾ S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas expandidas)

⁽²⁾ ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5%

⁽³⁾ $y = 21,223 + 0,1323x - 0,0003x^2$ $R^2 = 0,98$

Tabela 15 - Porcentagem de átomos de ^{15}N (at ^{15}N) e porcentagem de N absorvido pelas plantas derivada dos fertilizantes (NPF) nas folhas de milho amostradas na época do florescimento – Votuporanga (SP).

Tratamento	At 15N	NPF
	----- % -----	
UR + DCD	2,264 a	39,9 a
UR	1,842 b	31,0 b
CV	6,6	8,0
DMS	0,303	6,4

⁽¹⁾ Médias na coluna seguidas da mesma letra não se diferenciam estatisticamente (Teste T /LSD - 5%)

Nos dois locais, exceto para as testemunhas, que proporcionaram teores de N foliar de 21 g kg⁻¹ em Assis e 23,9 g kg⁻¹ em Votuporanga, os demais teores de N foliar estavam dentro ou muito próximos da faixa de teores considerada adequada por RAIJ et al. (1996), de 27 a 35 g N kg⁻¹ (Tabelas 13, 14, 16 e 17). SILVA et al. (2005) e GOMES et al. (2007) encontraram valores semelhantes nos teores de N foliar ao estudarem manejos de adubação nitrogenada na cultura do milho.

Tabela 16 – Teor de nitrogênio nas folhas de milho amostradas na época do florescimento, em função das épocas de aplicação, doses de N e uso de DCD na cultura do milho – Assis (SP).

Fonte	Época	Dose	N foliar	
		kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	
Testemunha	-	0	23,9	
UR	S	60	25,5	
		90	28,8	
		120	31,6	
	4F	60	28,3	
		90	30,7	
		120	33,3	
	4F+8F	60	29,4	
		90	30,7	
		120	32,0	
		150	33,3	
	UR+DCD	S	90	28,4
		4F	90	30,2
4F+8F		90	32,8	

Tabela 17 - Análise estatística das médias de N foliar por meio do Teste F e contrastes pré-definidos – Assis (SP).

Contraste / Atributo Comparado ⁽¹⁾	N Foliar	Probabilidade de F ⁽²⁾
	g kg ⁻¹	
1. Regressão para doses de N-UR em cobertura		
0 a 150 kg N ha ⁻¹ : Efeito linear ⁽³⁾	-	**
2. Época de aplicação de UR (Semeadura x Cobertura)		
Média S	28,6	**
Média (4F, 4F+8F)	30,7	
3. Época de aplicação de UR (Cobertura)		
Média 4F	30,8	ns
Média 4F+8F	30,7	
4. UR com x sem DCD (N=90 kg ha ⁻¹)		
Média UR	30,1	ns
Média UR+DCD	30,5	

⁽¹⁾ S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas expandidas)

⁽²⁾ ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5%

⁽³⁾ $y = 22,817 + 0,0617x$ $R^2 = 0,96$ **

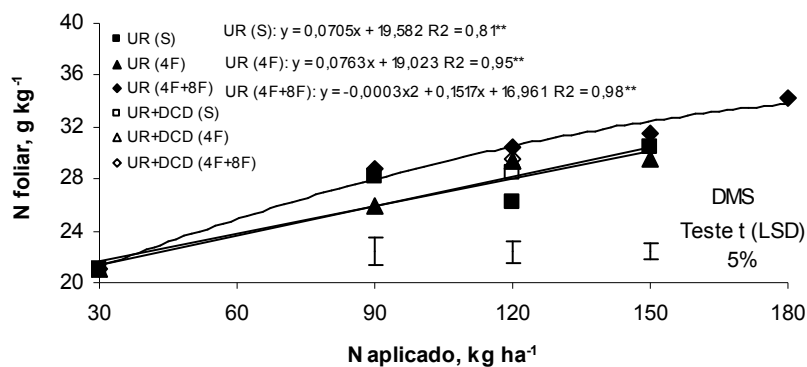


Figura 8 – Teor de nitrogênio nas folhas de milho na época do florescimento, em função das épocas de aplicação, doses de N-uréia e uso de DCD na cultura do milho. Na regressão, as doses de N incluem os 30 kg ha⁻¹, comuns a todas as parcelas – Votuporanga (SP). S; 4F; 4F+8F: épocas de aplicação do N na Semeadura, com 4 Folhas e com 4 Folhas + 8 Folhas expandidas, respectivamente.

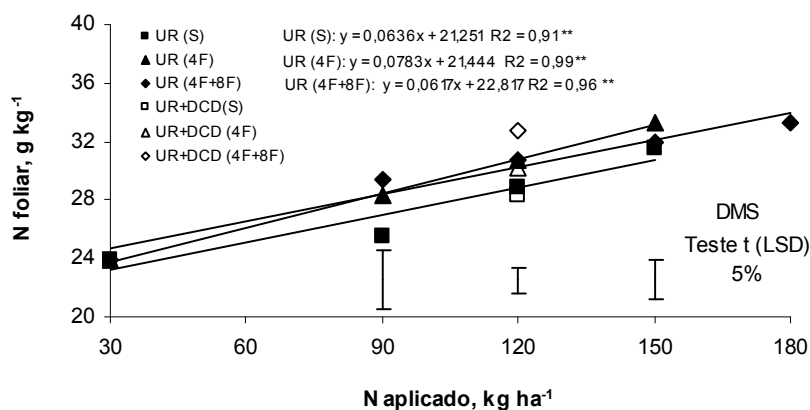


Figura 9 – Teor de nitrogênio nas folhas de milho na época do florescimento, em função das épocas de aplicação, doses de N-uréia e uso de DCD na cultura do milho. Na regressão, as doses de N incluem os 30 kg ha⁻¹, comuns a todas as parcelas – Assis (SP). S; 4F; 4F+8F: épocas de aplicação do N na Semeadura, com 4 Folhas e com 4 Folhas + 8 Folhas expandidas, respectivamente.

4.2.3 Rendimento de Grãos

O rendimento de grãos obtido em Votuporanga seguiu o mesmo padrão dos resultados encontrados para N no solo e N foliar. As aplicações de N em cobertura proporcionaram maiores rendimentos do que a aplicação na semeadura, sendo que a média dos tratamentos aplicados na semeadura foi de 7557 kg ha⁻¹ e a dos tratamentos aplicados em 4F e em 4F+8F foi de 8279 kg ha⁻¹. Além disso, a cobertura em 4F+8F resultou em maiores produções do que a cobertura em 4F, sendo 7989 kg ha⁻¹ a média dos tratamentos aplicados em 4F e 8568 kg ha⁻¹ a média dos tratamentos aplicados em 4F+8F de (Tabelas 18 e 19).

O uso de DCD da mesma forma que não proporcionou maior absorção de N pela planta, também não resultou em maior rendimento de grãos, embora houvesse indícios de que ela tenha proporcionado maior teor de N no solo. As médias dos tratamentos e as médias dos contrastes estão contidas respectivamente nas tabelas 18 e 19.

Apesar de não ter elevado os teores de N foliar, dados de microparcelas com ¹⁵N permitem constatar que ao fim do experimento, a DCD proporcionou maior porcentagem e maior quantidade de N na planta derivada do fertilizante do que a uréia: 29,8 % e 44,3 kg N ha⁻¹ com uréia e DCD e 23,8 % e 31,2 kg N ha⁻¹ com uréia sem DCD. Sendo assim, a eficiência de recuperação do fertilizante nitrogenado com DCD também foi superior à eficiência de recuperação do fertilizante sem DCD: 49,2 % com uréia e DCD e 34,7% com uréia sem DCD) (Tabela 20).

O uso de DCD elevou as porcentagens de N proveniente do fertilizante no colmo (26,0 % com DCD e 21,2 % sem DCD), na folha (31,7% com DCD e 25,0 sem DCD) e no sabugo do milho (27,1 com DCD e 21,0 sem DCD) (Tabela 21) e as quantidades de N proveniente do fertilizante nos grãos de milho (26,6 kg N ha⁻¹ com DCD e 17,8 kg N ha⁻¹ sem DCD) (Tabela 22).

Em Assis, o rendimento de grãos obtido foi inferior ao de Votuporanga, com produção de grãos de 3883 kg ha⁻¹ na testemunha e 6821 kg ha⁻¹ na média dos demais tratamentos adubados, contra, respectivamente, 4949 e 8094 kg ha⁻¹ em Votuporanga. O rendimento de grãos em Assis não foi influenciado nem pela aplicação de N em cobertura, nem pelo uso de DCD (Tabelas 23 e 24). Tanto as médias encontradas em Assis como em Votuporanga estão coerentes com as produções obtidas em outros trabalhos com adubação de milho realizados no Brasil (BORTOLINI et al., 2001; CERETTA et al., 2002; GOMES et al., 2007; MAI et al., 2003; SILVA et al., 2005).

Tabela 18 - Rendimento de grãos de milho na colheita, em função das épocas de aplicação, doses de N e uso de DCD na cultura do milho – Votuporanga (SP).

Fonte	Época	Dose	Rendimento de grãos
		kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Testemunha	-	0	4949
UR	S	60	7467
		90	7574
		120	7629
	4F	60	7332
		90	8117
		120	8518
	4F+8F	60	8086
		90	8553
		120	9066
150		9127	
UR+DCD	S	90	7567
	4F	90	8014
	4F+8F	90	8169

Tabela 19 - Análise estatística das médias de rendimento de grãos por meio do Teste F e contrastes pré-definidos – Votuporanga (SP).

Contraste / Atributo Comparado ⁽¹⁾	Rendimento de grãos	Probabilidade de F ⁽²⁾
	kg ha ⁻¹	
1. Regressão para doses de N-UR em cobertura		
0 a 150 kg N ha ⁻¹ : Efeito quadrático ⁽³⁾	-	**
2. Época de aplicação de UR sem DCD		
Média S	7557	**
Média (4F, 4F+8F)	8279	
3. Época de aplicação de UR em cobertura		
Média 4F	7989	**
Média 4F+8F	8568	
4. UR com x sem DCD (N=90 kg ha ⁻¹)		
Média UR	8081	ns
Média UR+DCD	7917	

⁽¹⁾ S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas expandidas)

⁽²⁾ ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5%

⁽³⁾ $y = 4989,4 + 62,629x - 0,236x^2$ $R^2 = 0,99$

Tabela 20 – Quantidade de N absorvida pelas plantas (QNP), quantidade de N absorvida pelas plantas derivada dos fertilizantes (QNPF), porcentagem de N absorvida pelas plantas derivada dos fertilizantes (NPF) e porcentagem de recuperação do fertilizante aplicado (RF), na parte aérea das plantas na época da colheita – Votuporanga (SP).

Tratamentos	QNP ⁽¹⁾		QNPF	NPF	RF ⁽²⁾		RF ⁽³⁾			
	kg N ha ⁻¹				%					
UR+DCD	150,0	a	44,3	a	29,8	a	49,2	a	54,7	a
UR	136,3	b	31,2	b	23,8	a	34,7	b	34,7	b
CV	3,2		10,4		10,1		10,4		10,9	
DMS	10,6		8,8		6,1		9,8		10,9	

⁽¹⁾ Médias nas colunas seguidas da mesma letra não se diferenciam estatisticamente (Teste T /LSD - 5%)

⁽²⁾ Considerando-se 90 kg N marcado tanto para o tratamento com DCD para o tratamento sem DCD

⁽³⁾ Considerando-se 90 kg N marcado para o tratamento sem DCD e 81 kg N marcado para o tratamento com DCD (N-DCD foi aplicado na dose de 10% N-UR, e não tinha N marcado)

Tabela 21 – Porcentagem de átomos de ¹⁵N (at ¹⁵N) e porcentagem de N absorvida pelas plantas derivada dos fertilizantes (NPF) nos quatro compartimentos da planta (colmo, folha, grão e sabugo) na época da colheita – Votuporanga (SP).

Tratamento	Colmo ⁽¹⁾		Folha		Grão		Sabugo									
	At ¹⁵ N	NPF	At ¹⁵ N	NPF	At ¹⁵ N	NPF	At ¹⁵ N	NPF								
UR+DCD	1,603	a	26,0	a	1,884	a	31,7	a	1,617	a	26,2	a	1,654	a	27,1	a
UR	1,374	b	21,2	b	1,567	b	25,0	b	1,369	a	21,0	a	1,369	b	21,0	b
CV	6,5		8,7		7,1		9,1		8,3		11,0		7,3		9,6	
DMS	0,219		4,602		0,275		5,780		0,278		5,854		0,247		5,198	

⁽¹⁾ Médias nas colunas seguidas da mesma letra não se diferenciam estatisticamente (Teste T /LSD - 5%)

Tabela 22 – Quantidade de N absorvida pelas plantas (QNP) e quantidade de N absorvida pelas plantas derivada dos fertilizantes (QNPF) nos quatro compartimentos da planta (colmo, folha, grão e sabugo) na época da colheita – Votuporanga (SP).

Tratamento	Colmo ⁽¹⁾		Folha		Grão		Sabugo									
	QNP	QNPF	QNP	QNPF	QNP	QNPF	QNP	QNPF								
UR+DCD	16,9	a	4,3	a	24,8	a	7,8	a	102,3	a	26,6	a	6,0	a	1,6	a
UR	19,0	a	3,9	a	23,8	a	5,8	a	86,9	b	17,8	b	6,6	a	1,4	a
CV	5,4		12,0		11,4		16,7		3,4		10,6		22,6		21,5	
DMS	2,2		1,1		6,2		2,6		7,3		5,3		3,2		0,7	

⁽¹⁾ Médias nas colunas seguidas da mesma letra não se diferenciam estatisticamente (Teste T /LSD - 5%)

Tabela 23 – Rendimento de grãos de milho na colheita, em função das épocas de aplicação, doses de N e uso de DCD na cultura do milho – Assis (SP).

Fonte	Época	Dose	Rendimento de grãos
		kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Testemunha	-	0	3.383
UR	S	60	6.151
		90	7.271
		120	7.273
	4F	60	6.278
		90	7.023
		120	7.079
	4F+8F	60	6.622
		90	6.519
		120	6.969
150		7.140	
UR+DCD	S	90	7.258
	4F	90	6.432
	4F+8F	90	6.660

Tabela 24 - Análise estatística das médias de rendimento de grãos por meio do Teste F e contrastes pré-definidos – Assis (SP).

Contraste / Atributo Comparado ⁽¹⁾	Rendimento de grãos	Probabilidade de F ⁽²⁾
	kg ha ⁻¹	
1. Regressão para doses de N-UR em cobertura		
0 a 150 kg N ha ⁻¹ : Efeito quadrático ⁽³⁾	-	**
2. Época de aplicação de UR sem DCD		
Média S	6898	ns
Média (4F, 4F+8F)	6748	
3. Época de aplicação de UR em cobertura		
Média 4F	6793	ns
Média 4F+8F	6703	
4. UR com x sem DCD (N=90 kg ha ⁻¹)		
Média UR	6938	ns
Média UR+DCD	6783	

⁽¹⁾ S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas expandidas)

⁽²⁾ ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5%

⁽³⁾ $y = 3485,2 + 58,907x - 0,2373x^2$ $R^2 = 0,96$

Tanto em Assis como em Votuporanga o rendimento de grãos foi incrementado pelas doses de N nas três épocas de adubação. As regressões contidas nas figuras 10 e 11 incluem a dose de 30 kg ha⁻¹ de N, comum a todos os tratamentos.

Em Assis, os máximos valores em rendimento de grãos foram obtidos com as doses de 153 kg N ha⁻¹ na semeadura (7352 kg ha⁻¹), 142 kg N ha⁻¹ na cobertura em 4F (7117 kg ha⁻¹) e 154 kg N ha⁻¹ na cobertura em 4F+8F (7141 kg ha⁻¹).

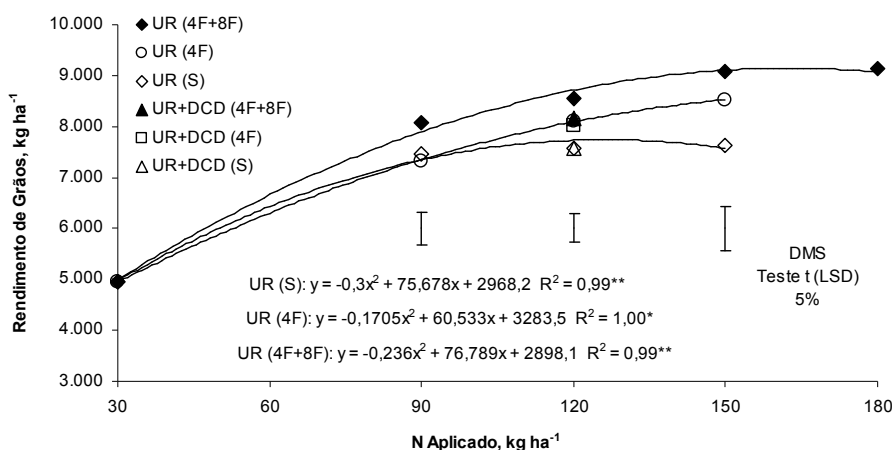


Figura 10 - Rendimento de grãos de milho na colheita, em função das épocas de aplicação, doses de N-uréia e uso de DCD na cultura do milho. Na regressão, as doses de N incluem os 30 kg ha⁻¹, comuns a todas as parcelas – Votuporanga (SP). S; 4F; 4F+8F: épocas de aplicação do N na Semeadura, com 4 Folhas e com 4 Folhas + 8 Folhas expandidas, respectivamente.

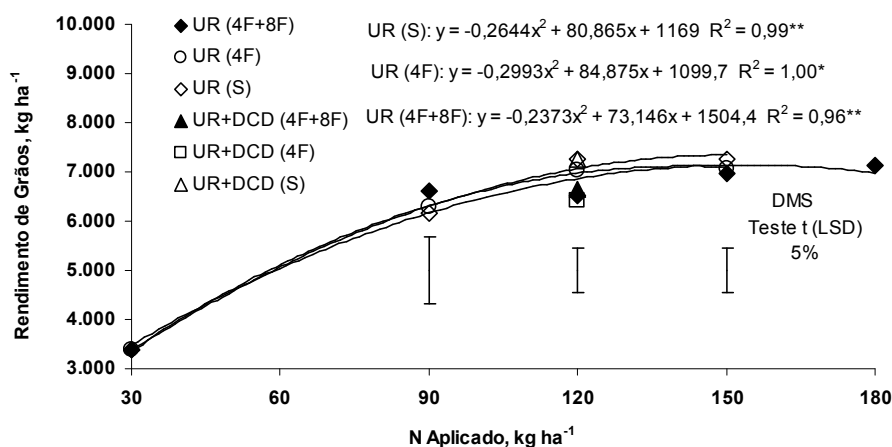


Figura 11 – Rendimento de grãos de milho na colheita, em função das épocas de aplicação, doses de N-uréia e uso de DCD na cultura do milho. Na regressão, as doses de N incluem os 30 kg ha⁻¹, comuns a todas as parcelas – Assis (SP). S; 4F; 4F+8F: épocas de aplicação do N na Semeadura, com 4 Folhas e com 4 Folhas + 8 Folhas expandidas, respectivamente.

Em Votuporanga, os máximos valores em rendimento de grãos foram obtidos com as doses de 126 kg N ha⁻¹ na semeadura (7741 kg ha⁻¹), 178 kg N ha⁻¹ na cobertura em 4F (8656 kg ha⁻¹) e 163 kg N ha⁻¹ na cobertura em 4F+8F (9144 kg ha⁻¹).

4.2.4 Interação (N no solo x N foliar x Rendimento de grãos)

Nesta seção serão discutidas as inter-relações entre os resultados obtidos para os teores de N no solo, teores de N na planta e rendimento de grãos, em função das épocas de adubação e do uso do inibidor. Para isso, dados climáticos e técnicas isotópicas com uso de ^{15}N servirão de apoio.

Em Votuporanga os resultados obtidos em função das adubações em cobertura foram coerentes. Essas adubações resultaram em maior teor de N no solo (Tabela 11), maior teor de N foliar (Tabelas 13 e 14) e maior rendimento de grãos (Tabelas 18 e 19) do que a adubação apenas na semeadura. Além disso, a cobertura realizada em 4F+8F resultou em maiores valores para as variáveis citadas do que a cobertura em 4F.

Considerando-se os resultados da análise do solo amostrado no estágio de 12 folhas (Tabela 11), observa-se que as adubações em cobertura, principalmente a cobertura parcelada em 4F+8F proporcionaram maiores quantidades de N inorgânico do que as adubações na semeadura. Essa maior concentração de N pode ser justificada em função de possíveis perdas de N no início do ciclo do milho, quando as plantas tinham sistema radicular pouco desenvolvido e menor demanda pelo nutriente.

Acredita-se que no dia 07/01/2008, 12 dias após o estágio de 4 folhas, a ocorrência de uma precipitação de 63 mm (Figura 2) pode ter sido suficiente para lixiviar quantidades apreciáveis de N nítrico proveniente do fertilizante para camadas de solo com baixa concentração de raízes. Até então, muito pouco havia chovido na área (20 mm em 14 dias da semeadura até o estágio de 4 folhas e 7 mm deste estágio até a referida data) e o solo estava com déficit hídrico (Figura 2). No período compreendido da semeadura até a referida data onde ocorreu a precipitação de 63 mm, é provável que consideráveis quantidades de N já haviam sido oxidadas a nitrato pelas bactérias nitrificantes do solo, o que favoreceria a ocorrência de lixiviação.

Entre o dia 7/01/2008 e o estágio de 8 folhas, choveu 0,6 mm em 3 dias. Desse estágio, em que foi realizada a última adubação até o estágio de 12F, onde foi realizada a primeira amostragem de solo, as chuvas ficaram mais constantes e regulares. De 8F a 12F choveu 187 mm em 14 dias, mas o pico foi somente 40 mm em um único dia. A regularidade pluvial aliada à intensa demanda das plantas de milho por N nesta fase e às quantidades consideráveis encontradas de N inorgânico no solo na amostragem no estágio de 12F (entre 47 e 104 kg N ha⁻¹ na camada de 0 a 60 cm, das áreas com

aplicações feitas em 4F+8F), são indícios de que nesse período as chances de ter ocorrido lixiviação de N foram menores.

Do estágio de 12 F até o florescimento choveu 218 mm em 18 dias, com pico de 78 mm em um dia (Figura 2). No florescimento, quantidades inexpressivas de N inorgânico foram encontradas no solo (Tabela 12), e acredita-se que a maior parte do N aplicado já havia sido absorvida pelas plantas ou lixiviada.

As plantas de milho apresentam maior demanda por N a partir do estágio com quatro a cinco folhas expandidas e o suprimento insuficiente do elemento nessa fase pode reduzir a diferenciação do número de óvulos nos primórdios da espiga e o número de espigas por planta e, com isso, afetar negativamente o rendimento de grãos (MENGEL & BARBER, 1974, citados por DUETE et al. 2008). CANTARELLA (1993) afirma que a absorção de nitrogênio pelo milho é mais intensa no período entre 40 e 60 dias pós a germinação, mas a planta ainda absorve cerca de 50% do nitrogênio que necessita após o início do florescimento. Para ARNON (1975), citado por BULL (1993), as exigências de nitrogênio variam consideravelmente com os diferentes estádios de desenvolvimento da planta, sendo mínimas nos estádios iniciais, aumentando com a elevação das taxas de crescimento e alcançando um pico entre o período compreendido entre o início do florescimento e o início da formação de grãos.

Os dados climáticos, explicam porque as adubações em cobertura, principalmente a cobertura parcelada em 4F+8F resultaram em maiores teores de N nas folhas de milho na época do florescimento e maiores rendimentos de grãos na colheita do que a adubação de semeadura. Como já foi discutido antes, provavelmente a ocorrência de uma precipitação de 63 mm no dia 07/01/2008 (período entre o estágio de 4F e 8F) foi suficiente para lixiviar quantidades apreciáveis de N-nítrico provenientes do fertilizante para camadas de solo com baixa concentração de raízes (Figura 2).

Esperava-se que no experimento de Votuporanga, onde a aplicação de N em semeadura resultou em menores teores foliares e rendimento de grãos do que as adubações em cobertura, portanto, com chances de ter havido perdas por lixiviação, o uso de DCD pudesse representar uma alternativa de manejo para aumentar a produtividade de grãos, mas isso não foi o que ocorreu.

O uso de DCD resultou em maiores teores de $N-NH_4^+$ no solo na camada de 0-20 cm, que é onde se concentrava a maior parte do N aplicado no estágio de 12F, e maiores quantidades de N inorgânico ao longo dos 60 cm (Tabela 11). Entretanto, esses benefícios não foram revertidos nem em maior absorção de N pelas plantas no

florescimento (Tabelas 13 e 14), nem em maior rendimento de grãos na colheita (Tabelas 18 e 19).

Apesar de não ter elevado os teores de N foliar, dados de microparcels com ^{15}N permitem constatar que nas folhas das plantas adubadas com uréia e DCD, amostradas na época do florescimento, o N proveniente do fertilizante representava 39,9% do total do N foliar; nas folhas das plantas adubadas com uréia, esse número correspondia a 31,0% (Tabela 15).

Na colheita, situação semelhante foi encontrada. A aplicação de uréia e DCD promoveu acúmulo de maiores quantidades de N do fertilizante pela parte aérea das plantas (colmo + folha + sabugo + grãos) do que a aplicação de uréia sem o inibidor (Tabela 20). Porém, como a absorção de N do solo pelas plantas foi muito maior do que a absorção de N dos fertilizantes, a porcentagem de N nas plantas derivada dos fertilizantes foi pequena. Para o tratamento com uréia, as plantas absorveram 136,3 kg N ha⁻¹, dos quais 31,2 kg foram provenientes do fertilizante (23,8 %) e 105,1 kg foram provenientes do solo (76,2%). Para o tratamento com uréia e DCD, as plantas absorveram 150 kg N ha⁻¹, dos quais 44,3 kg foram provenientes do fertilizante (29,8%) e 105,7 kg foram provenientes do solo (70,2%). Dessa forma, o uso de DCD promoveu um acréscimo de absorção de 13,1 kg de N do fertilizante nas plantas de milho, mas que não foi suficiente para influenciar os teores de N foliar ou o rendimento de grãos.

DUETE et al. (2008), estudando o efeito de doses e parcelamentos de N na adubação de milho, relatam que a porcentagem média de nitrogênio proveniente da uréia nas plantas de milho foi de 39%, indicando que o solo foi o maior fornecedor de N para as plantas. Esses dados são coerentes com os encontrados nesse trabalho.

A análise de cada um dos compartimentos da planta permite constatar que o uso de uréia e DCD proporcionou maior porcentagem de átomos de ^{15}N no colmo, na folha e no sabugo em relação aos tratamentos sem DCD, o que indica que, nesses compartimentos, a porcentagem de N na planta derivada do fertilizante, foi maior onde se aplicou uréia tratada com o inibidor de nitrificação (Tabela 21). Nos grãos, apesar de não ter havido diferença significativa na concentração de ^{15}N nos grãos entre os tratamentos, houve maior acúmulo de N proveniente do fertilizante quando se utilizou o inibidor (Tabela 22).

A recuperação de N-fertilizante no tratamento contendo o inibidor também foi maior. Quando se considerou que ambos os tratamentos forneceram 90 kg ha⁻¹ de N marcado com ^{15}N , a recuperação foi de 49,2 % do N- uréia com DCD e 34,7% do N-

uréia. Entretanto, no tratamento com DCD, apenas 81 kg N ha⁻¹ foram provenientes da uréia marcada com ¹⁵N; os outros 9 kg ha⁻¹ eram de N do DCD. Sendo assim a eficiência de recuperação real de N desse fertilizante foi de 54,7% (Tabela 20).

No Brasil, as recuperações de N da uréia pelas plantas de milho foram avaliadas por pesquisadores como LARA CABEZAS et al. (2005), que acharam valor de 34%, GROVE et al. (2000), 50%, COELHO et al. (1991), 56% e LARA CABEZAS & COUTO (2007), 60%.

Não foram encontrados dados com recuperação de ¹⁵N proveniente de fertilizantes com DCD para milho. Na cultura do trigo, HOU et al. (2006) relatam que a recuperação do N da uréia foi de 65,2%, enquanto a recuperação do N da uréia com DCD foi de 69,37%. Nesse trabalho, o uso de DCD também não conferiu maiores produtividades de grãos.

Ressalta-se que para o cálculo da quantidade de nitrogênio na planta derivado do fertilizante, foi considerado também o N marcado absorvido pelas plantas das linhas laterais à direita e à esquerda da linha adubada com os fertilizantes marcados com ¹⁵N; dessa forma, na linha adubada a absorção foi equivalente a 40,3 kg ha⁻¹ para o tratamento com DCD e 28,8 kg ha⁻¹ de N para o tratamento sem DCD; o N absorvido pelo milho proveniente do fertilizante aplicado nas linhas laterais foi equivalente 4 kg ha⁻¹ no tratamento com DCD e 2,4 kg ha⁻¹ no tratamento sem DCD (Tabela 20). Os fertilizantes nitrogenados foram aplicados a 20 cm das linhas; sendo assim, as quantidades absorvidas pelas linhas vizinhas foram pequenas.

Além disso, uma parte do fertilizante deve ter permanecido nas raízes do milho. Nesse experimento isso não foi avaliado, mas em trabalhos como de GAVA et al. (2006), que utilizaram ¹⁵N para avaliar o balanço de N no sistema solo-planta para a cultura do milho em plantio direto, as raízes de milho coletadas ao fim do ciclo (25 cm para cada lado da linha de milho e até a profundidade de 30 cm no solo) absorveram N do fertilizante aplicado na proporção de 2,53 % do total de N do fertilizante absorvido pela parte aérea. Numa situação dessas, no presente trabalho a recuperação do tratamento com uréia aumentaria em 0,79 kg ha⁻¹ e a do tratamento com uréia e DCD aumentaria em 1,12 kg ha⁻¹.

Um outro destino do N seria a imobilização pela microbiota do solo. COELHO et al. (1991), que também utilizaram-se de técnicas isotópicas para estudar a adubação nitrogenada do milho em SPD, observaram que 23% do N proveniente do fertilizante aplicado ao milho ficaram retidos numa camada de 90 cm de solo após a colheita do

milho. Nesse experimento, os fertilizantes foram incorporados ao solo a 5 cm e, portanto, é pouco provável que tenha havido perdas por volatilização de NH_3 (ERNST & MASSEY, 1960). Assim, é provável que o destino de boa parte do N não absorvido pelas plantas tenha sido a imobilização pela matéria orgânica do solo, do mesmo modo que aconteceu no experimento de COELHO et al. (1991). Usando os dados daqueles autores, no presente experimento ficariam imobilizados cerca de 21 kg ha^{-1} do N aplicado.

Os dados com ^{15}N ajudam a explicar porque as adubações com o inibidor de nitrificação não resultaram em maiores teores de N nas folhas de milho na época do florescimento e maiores rendimentos de grãos na colheita do que a adubação de semeadura

Em Assis os resultados obtidos em função das coberturas, a princípio não foram tão coerentes. Essas adubações resultaram em maior teor de N foliar (Tabelas 16 e 17) do que a aplicação de N na semeadura. Entretanto, não houve efeito das coberturas para o rendimento de grãos (Tabelas 23 e 24).

Neste experimento, os resultados da análise de solo pouco contribuem para a elucidação dos dados. Apesar de indicarem que não houve efeito das coberturas para os teores de N no solo, os valores encontrados foram muito baixos, indicando ter restado pouco N mineral no solo na época do florescimento (Tabela 10).

É provável que eventos de precipitação pluvial ocorridos entre a semeadura e o estágio de 4F possam ter contribuído para lixiviar parte do N aplicado na semeadura, o que justificaria o menor teor de N foliar nos tratamentos aplicados nessa época em relação aos tratamentos em cobertura (Figura 1).

Da semeadura até o estágio de 4F, choveu 98 mm em 17 dias, o que num solo arenoso, considerando que o sistema radicular do milho ainda não era muito desenvolvido, pode ter lixiviado parte do N aplicado, para profundidades com pequena densidade radicular.

Desse estágio ao estágio de 8F, choveu 98 mm em 14 dias (Figura 1), precipitação semelhante ao período anterior, mas aqui é provável que as raízes de milho já estivessem maiores e a planta estivesse demandando maiores quantidades de N para seu crescimento vegetativo. Então nesse período acredita-se que não tenha havido perdas consideráveis de N por lixiviação.

Entre o estágio de 8F e o florescimento choveu 217 mm em 47 dias. As baixas quantidades de N encontradas no solo na época do florescimento (Tabela 10) indicam

que o N aplicado foi absorvido pelas plantas ou perdido do sistema. Como não houve diferença nos teores foliares entre os tratamentos 4F e 4F+8F (Tabelas 13 e 14), acredita-se que a maior parte do N tenha sido absorvido pelas plantas. Porém não se descarta a hipótese de que uma parte também possa ter sido lixiviada.

Apesar das adubações em cobertura terem resultado em maiores teores de N foliar do que a adubação de semeadura (Tabelas 13 e 14), maiores rendimentos de grãos não foram obtidos com essas práticas (Tabelas 23 e 24)

Um ponto a se considerar, é que o teor de N foliar proporcionado pelos tratamentos aplicados na semeadura ($28,6 \text{ g kg}^{-1}$), embora menor do que os teores proporcionados pelas adubações em cobertura ($30,7 \text{ g kg}^{-1}$), ainda assim estava em valor dentro da faixa considerada adequada por RAIJ et al. (1996) para o bom desenvolvimento da cultura do milho, que é de 27 a 35 g N kg^{-1} . Assim, os maiores teores foliares observados nos tratamentos com aplicações de N em cobertura provavelmente não se reverteram em produtividade de grãos.

Além disso, os rendimentos de grão obtidos em Assis foram relativamente pequenos. Enquanto em Assis a testemunha produziu 3383 kg de grãos de milho e os demais tratamentos adubados produziram uma média de 6821 kg (Tabelas 23 e 24), em Votuporanga esses valores foram respectivamente de 4949 kg e 8094 kg (Tabelas 18 e 19). As baixas produtividades provavelmente não demandaram a absorção de maiores quantidades de N do que a fornecida pelos tratamentos da semeadura, que foram suscetíveis a perdas de N por lixiviação. Dessa forma, o rendimento de grãos não foi influenciado pelas épocas de aplicação.

De forma geral, nas plantas de milho que receberam adubação nitrogenada, os teores de macro e micronutrientes considerados adequados por RAIJ et al. (1996) foram encontrados nas folhas na época do florescimento (Anexos 1 e 2).

Em Assis, provavelmente o solo ácido não proporcionou um meio adequado para o bom desenvolvimento das plantas. Nas três profundidades caracterizadas na época da semeadura, os valores das variáveis pH, Ca, Mg, SB e V% eram menores do que os encontrados no solo de Votuporanga, enquanto a variável H+Al teve valores maiores (Tabelas 4 e 6). Isso pode justificar as produtividades relativamente baixas ao fim do ciclo. Um mês antes da amostragem do solo para caracterização química no início do experimento e semeadura, foi realizada calagem na área com 2 t ha^{-1} de calcário. Entretanto, a mesma foi feita em superfície, e é provável que o calcário não tenha reagido no solo em tempo suficiente.

O milho se desenvolve bem em solos com pH próximo da neutralidade. Portanto, a calagem é uma prática importante para o cultivo dessa cultura em solos ácidos (CANTARELLA, 1993). A calagem interfere diretamente na toxidez de Al, que restringe o crescimento radicular; dessa maneira, propicia condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas (LEITE et al., 2006). CAÍRES et al. (2004) relatam que a realização de calagem em plantio direto ocasionou aumento na produção de milho da ordem de 13 %.

Outro fator que pode ajudar a explicar as menores produções em Assis é a disponibilidade hídrica do solo, que entre o estágio de 12 folhas e o florescimento, foi relativamente menor do que a encontrada em Votuporanga (Figuras 1 e 2). De acordo com FANCELLI & DOURADO NETO (2004) para o milho, as maiores exigências em água se concentram na fase de emergência, florescimento e formação do grão. Todavia, no período compreendido entre 15 dias antes e 15 dias após o aparecimento da inflorescência masculina, o requerimento de um suprimento hídrico satisfatório aliado a temperaturas adequadas tornam tal período extremamente crítico. Para BERGAMASCHI et al. (2004), independente da condição climática regional, a produtividade de grãos de milho é decorrente das condições hídricas durante o período crítico, que vai do pendoamento ao início do enchimento de grãos.

A semeadura em Votuporanga foi realizada mais tardiamente e a cultura passou por um período seco no início de seu desenvolvimento. Apesar disso, durante o período crítico, boas condições hídricas foram encontradas (Figura 2) e a produtividade de grãos não foi afetada. Do estágio de 12F até o florescimento choveram 218 mm em 18 dias (Figura 2). Essas condições foram melhores que as encontradas em Assis, onde do estágio de 12F até o florescimento choveram 114,6 mm em 23 dias (Figura 1). De acordo com BERGAMASCHI et al. (2004), no período do florescimento ao início da formação de grãos, somente a chuva e a irrigação podem manter a produtividade em níveis elevados, de ordem de 8000 kg ha^{-1} , se não houver limitação por outros fatores.

O fato de em Votuporanga ter ocorrido excedente hídrico considerável de 120,7 mm no terceiro decêndio de janeiro (Figura 2), portanto, antes do florescimento, é mais um fator que ajuda a explicar porque os rendimentos de grãos foram maiores que em Assis, onde houve excedente hídrico expressivo apenas no segundo decêndio de janeiro, depois do florescimento, de 101,0 mm (Figura 1). Esse fato também justifica as diferenças de produção que ocorreram em função da época de adubação em Votuporanga, onde esse excedente pode ter sido suficiente para lixiviar N. Em Assis, os

excedentes hídricos do período da semeadura até o florescimento foram muito pequenos, indicando não haver condições propícias à lixiviação de nitrato e justificando a ausência de efeito de épocas de aplicação de N.

Além disso, as temperaturas entre o estágio de 12F e o florescimento estavam mais elevadas em Votuporanga; lá houve acúmulo de 263 graus-dia em 18 dias, enquanto em Assis houve acúmulo de 317 graus-dia em 23 dias, o que pode ter favorecido o processo de fotossíntese. O milho, por ser uma espécie de metabolismo C₄, tende a expressar sua elevada produtividade quando a máxima área foliar coincidir com a maior disponibilidade de radiação solar, desde que não haja déficit hídrico (BERGAMASCHI et al., 2004).

Em Assis, não havendo diferença de produtividade entre as épocas de adubação, era de se esperar que o uso de DCD não apresentasse vantagens agrônômicas em relação à aplicação apenas de uréia. De fato, foi o que ocorreu; mesmo que DCD tenha inibido a nitrificação e, assim, mantido o N do solo na forma de NH₄⁺ por mais tempo, o que não ficou claro em função das baixas quantidades de N encontradas, seu uso não foi suficiente para aumentar os teores de N foliar (Tabelas 16 e 17) nem o rendimento de grãos (Tabelas 23 e 24).

No presente estudo houve um caso que o rendimento de grãos de milho foi afetado pela realização de adubações em cobertura (Votuporanga) e outro que não (Assis), em função das condições edafoclimáticas dos dois locais. Diversos estudos pelo Brasil confirmam que o manejo da adubação nitrogenada para o milho em SPD deve ser feita com base nas expectativas climáticas.

Assim como em Assis, SÁ (1996) mostrou que é possível manter as mesmas produtividades de milho em sistema plantio direto independente da época de aplicação de N. O autor antecipou a adubação de cobertura do milho para a época de pré-semeadura e obteve resultados satisfatórios. Entretanto, esses estudos foram conduzidos no Estado do Paraná, em áreas com sistema plantio direto há vários anos e com bom acúmulo de matéria orgânica. De acordo com CANTARELLA (2007), nessas condições, o suprimento natural de N do solo é normalmente alto, como indicam os altos resultados obtidos nas parcelas sem a adição de fertilizante nitrogenado, o que pode explicar o pequeno efeito da época de aplicação de N.

Vários relatos na literatura corroboram os dados encontrados em Votuporanga, onde a ocorrência de precipitações pluviais elevadas no início do ciclo pode ocasionar em perdas de produção quando se faz a adubação do milho em pré-semeadura ou

semeadura (BORTOLINI et al., 2001; MAI et al., 2003; POTTKER & WIETHOLTER, 2004; SILVA et al., 2005).

Há ainda, trabalhos que não demonstraram perdas de produção de milho ao se antecipar as adubações nitrogenadas; porém, os autores afirmam que como não é possível prever a ocorrência de elevadas precipitações, essa é uma prática arriscada, e recomendam a adubação tradicional, em semeadura e cobertura (BASSO & CERETTA, 2000; CERETTA et al., 2002).

O uso de DCD seria uma alternativa para tentar antecipar essas adubações com mais segurança, minimizando-se as chances de perda de N por lixiviação e consequentemente mantendo as produtividades em altos níveis. Porém nos experimentos de campo realizados neste trabalho isso não ocorreu.

A DCD, apesar de ter sido utilizada em solo arenoso e na época do verão não proporcionou incrementos de produção em nenhum dos dois casos; em Votuporanga, dados com ^{15}N indicam que ela aumentou a eficiência de uso do N-UR, porém essa maior eficiência não foi transformada em incrementos de produtividade de grãos, porque mais de 70% do N absorvido pela planta foi suprido pelo solo; em Assis, a ausência de resposta às adubações em cobertura indica que o N não foi um fator limitante à produção, e não houve condições favoráveis para testar o inibidor.

No Brasil, não existiam trabalhos que estudaram o uso de DCD em condições de campo. Na literatura internacional há resultados divergentes. MALZER et al. (1989) estudaram o comportamento de DCD na adubação nitrogenada do milho durante 13 anos e concluíram que os maiores efeitos ao uso de inibidores de nitrificação podem ser obtidos em solos arenosos. Em 20 comparações com e sem DCD adicionado à uréia aplicada em pré-plantio na primavera, houve aumento significativo em 9, com porcentagem média de incrementos relativos de 27,1%.

Estudos conduzidos na região sudeste dos Estados Unidos indicam que de forma geral, DCD inibiu a nitrificação por algumas semanas, porém, essa inibição nem sempre refletiu em incrementos de produtividade; isso geralmente ocorreu quando DCD foi adicionado nas doses mais baixas de N (FRYE, 1989). Além disso, nesse mesmo estudo, não foram obtidas vantagens de uso de DCD sob fortes precipitações pluviais. FRYE (1989) alega que duas precipitações ocorridas após a aplicação dos adubos, de 140 e 160 mm foram suficientes para separar o DCD da uréia por lixiviação, diminuindo sua efetividade. Acredita-se que as precipitações ocorridas nos dois experimentos de campo desse trabalho não foram suficientes para causar tal efeito.

Na Alemanha, BUERKERT et al. (1995) estudaram o comportamento de DCD na adubação nitrogenada de milho para silagem, e encontraram a mesma situação presenciada em Assis. Uma vez que as perdas de N por lixiviação entre a aplicação do fertilizante e o início da absorção de N pelas plantas foram desprezíveis, a produção final de matéria seca e a absorção de N não foram significativamente afetadas pelas fontes de N ou época de aplicação e conseqüentemente, nem o uso do inibidor, nem o parcelamento da adubação proporcionaram vantagens agronômicas.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- a) Em condições controladas de laboratório, a DCD foi efetiva em inibir a nitrificação, mantendo mais da metade do N-inorgânico na forma de amônio até 30 dias.
- b) Em campo, a DCD também aumentou a eficiência de uso do N da uréia pelas plantas de milho, porém, o inibidor não proporcionou incrementos no rendimento de grãos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-SABOUR M.F.; MASSOUD, M.A.; BAVEYE, P. The effect of water movement on the transport of dicyandiamide, ammonium and urea in unsaturated soils. **Z Pflanzenernäh Bodenk**, v. 153, p. 245-247, 1990.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 241-248, 2002.
- AMBERGER, A. Research on dicyandiamide as a nitrification inhibitor and future outlook. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 20, n. 19 e 20, p. 1933-1955, 1989.
- ARAÚJO, L.A.N.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 771-777, 2004.
- ARNON, I. Mineral nutrition of maize. Bern: International Potash Institute, 1975. 452p.
- BASSO, C. J.; CERETTA, C. A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 905-915, 2000.
- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agrônomo, Campinas, 1983. 41p.
- BENDASSOLLI, J.A.; TRIVELIN, P.C.O.; IGNOTO, R.F. Produção de amônia anidra e aquamônia enriquecida em ^{15}N a partir de $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. **Scientia Agricola**, v. 9, n. 3, p.595-603, 2002.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p. 831-839, 2004.
- BOCK, B.R.; LAWRENCE, J.E.; WILLIAMS, H.M. Relative mobility of dicyandiamide, ammonium and urea by mass flow in soils. In: HAUCK, R.D.; BEHNKE, H. (eds). Proceedings of the Technical Workshop on Dicyandiamide. Trostberg, Germany, p. 25-37, 1981.
- BORTOLINI, C.G.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; FORSTHOFER, E.L. Rendimento de grãos de milho cultivado após aveia-preta em resposta a adubação nitrogenada e regime hídrico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1101-1106, 2001.
- BREMNER, J.M. Sources of nitrous oxide in soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 49, p. 7-17, 1997.

BRONSON, K.F.; TOUCHTON, J.T.; HAUCK, R.D. Decomposition rate of dicyandiamide and nitrification inhibition. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 20, n. 19 e 20, p. 2067-2078, 1989.

BUCKMAN, H.O.; BRADY, N.C. The nature and properties of soils. 7.ed. New York: The Macmillan Company, 1969. 653p.

BUERKERT, B.; HORLACHER, D.; MARSCHNER, H. Time course of nitrogen in soil solution and nitrogen uptake in maize plants as affected by form and application time of fertilizer nitrogen. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 174, n. 5, p. 325-336, 1995.

BULL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (eds). Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, Potafos, p. 63-145, 1993.

BUZETTI, S.; PEREZ, A. A. G.; ANDREOTTI, M. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 31., Gramado, 2007. Resumos. CD-Rom.

CAIRES, E. F. ; KUSMAN, M. T. ; BARTH, G. ; GARBUIO, F. J. ; PADILHA, J. M. . Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94p.

CAMERON, K.C.; DI, H.J. Nitrogen Leaching Losses From Different Forms and Rates of Farm Effluent Applied to a Templeton Soil in Canterbury, New Zealand. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 4, p. 429-437, 2004.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (eds). Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, Potafos, p. 147-196, 1993.

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

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

CANTARELLA, H.; LERA, F.L.; BOLONHEZI, D.; LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. Antecipação de N em milho em sistema plantio direto usando ¹⁵N-uréia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, 2003. Resumos. CD-Rom.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. In: FANCELLI, A.L. (ed). Milho - Nutrição e Adubação. Piracicaba, FEALQ, p. 36-55, 2008.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. O uso de inibidor de urease para aumentar a eficiência da uréia. In: Simpósio sobre Informações Recentes para Otimização da Produção Agrícola, 2007, Piracicaba. 19p. CD-Rom.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (eds). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo, p. 270-276, 2001.

CERETTA, C. A. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia/milho, no sistema plantio direto. In: FRIES, M.R.; DALMOLIN, R.S.D. (eds). Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto. Santa Maria, UFSM, p. 112-124, 1997.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; DIEKOW, J.; AITA, C.; PAVINATO, P.S.; VIEIRA, F.C.B.; VENDRUSCULO, E.R.O. Nitrogen fertilizer split-application for corn in no-till succession to black oats. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 3, p. 549-554, 2002.

CHANCY, H.F. & KAMPRATH, E.J. Effect of Nitrapiryn on N Response of Corn on Sandy Soils. **Agronomy journal**, v. 74, p. 565-569, 1982.

CHRISTENSEN, R. H.; HUFFMAN, J. R. Response of corn to preplant applications of nitrogen and to nitrogen plus nitrapyrin. **Journal of Production Agriculture**, v. 5, n. 3, p. 352-358, 1992.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Balanço de nitrogênio (¹⁵N) em um latossolo vermelho escuro, fase cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 2, p. 187-193, 1991.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3graos_08.09.pdf, (25 janeiro2009).

COOKSON, R.W.; CORNFORTH, I.S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 34, p. 1461-1465, 2002.

DE KLEIN, C.A.M.; LEDGARD, S.F. Nitrous Oxide Emissions From New Zealand Agriculture - Key Sources and Mitigation Strategies. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 72, n. 1, p. 77-85, 2005.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. Effects of temperature and application rate of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (dcd), on nitrification rate and microbial biomass in a grazed pasture soil. **Australian Journal of Soil Research**, v.42, n.8, p.927-932, 2004a.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. Effects of the Nitrification Inhibitor Dicyandiamide on Potassium, Magnesium and Calcium Leaching in Grazed Grassland. **Soil Use and Management**, v. 20, n. 1, p. 2-7, 2004b.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. Mitigation of Nitrous Oxide Emissions in Spray-Irrigated Grazed Grassland by Treating the Soil With Dicyandiamide, a Nitrification Inhibitor. **Soil Use and Management**, v. 19, n. 4, p. 284-290, 2003.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. Nitrous Oxide Emissions From Two Dairy Pasture Soils as Affected by Different Rates of a Fine Particle Suspension Nitrification Inhibitor, Dicyandiamide. **Biology and Fertility of Soils**, v.42, n. 6, p. 472-480, 2006.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. Reducing Environmental Impacts of Agriculture by Using a Fine Particle Suspension Nitrification Inhibitor to Decrease Nitrate Leaching From Grazed Pastures. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 109, n. 3 e 4, p. 202-212; 2005.

DINNES, D.L.; KARLEN, D.L.; JAYNES, D.B.; KASPAR, T.C.; HATFIELD J.L.; COLVIN, T.S.; CAMBARDELLA, C.A. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 153-171, 2002.

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solo, Rio de Janeiro, 2.ed. 306 p., 2006.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. Nutrição mineral de plantas. Princípios e perspectivas. Traduzido por Nunes, M.E.T. Londrina: Editora Planta, 2006, 401p.

ERNST, J.W.; MASSEY, H.F. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 24, p. 87-90, 1960.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Produção de milho. 2.ed. Piracicaba: Os autores, 2004. 360 p.

FERNANDES, F.C.S.; LIBARDI, P.L.; TRIVELIN, P.C.O. Parcelamento da adubação nitrogenada na cultura do milho e utilização do N residual pela sucessão aveia preta-milho. **Ciência Rural**, v. 38, p. 1138-1141, 2008.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: Resumos da 45ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria, São Carlos, p. 255-258, 2000.

FILLERY, I.R.P. Plant-based manipulation of nitrification in soil: a new approach to managing N loss? **Plant and Soil**, v. 294, p. 1-4, 2007.

FRYE, W.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. 8p. CR-ROM.

FRYE, W.W.; GRAETZ, D.A.; LOCASCIO, S.J.; REEVES, D.W.; TOUCHTON, J.T. Dicyandiamide as a nitrification inhibitor in crop production in the southeastern USA. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 20, n. 19 e 20, p. 1969-1999, 1989.

FURTINI NETO, A.S.; VALE, F.R. do; RESENDE, A.V. de; GUILHERME, L.R.G.; GUEDES, A. A. Fertilidade do solo. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252p.

GADIOLI, J.L.; DOURADO-NETO, D.; GARCIA, A.G.y; BASANTA, M.V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 377-383, 2000.

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

GIOACCHINI, P.; NASTRI, A.; MARZADORI, C.; GIOVANNINI, C.; ANTISARI, L. V., AND GESSA, C. Influence of Urease and Nitrification Inhibitors on N Losses From Soils Fertilized With Urea. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, n. 2, p. 129-135, 2002.

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

GROVE, L.T.; RICHET, K.D.; NADERMAN, G.C. Nitrogen fertilization of maize on oxisol of the cerrado of Brazil. **Agronomy Journal**, v. 27, p. 261-265, 1980.

HALL, W. Benefits of enhanced-efficiency fertilizers for the environment. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, Frankfurt, 2005. Proceedings: Paris, International Fertilizer Industry Association, 2005. 9p. CR-ROM.

HAUCK, R.D. Nitrogen - Isotope ratio analysis. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D. R. (eds). *Methods of Soil Analysis*. 2.ed. Madison, ASA. p. 735-802, 1982.

HOU, X.; HUA, J.; LIANG, W.; YANG, D. Effect of combined application of urease and nitrification inhibitors on yield and quality of wheat. **Agricultural Journal**, v. 1, n. 2, p. 109-112, 2006.

IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea/subjetiva.aspx?cod_sis=1, (10 janeiro 2009).

IFA. Fertilizer consumption statistics, <http://www.fertilizer.org/ifa/statistics/IFADATA/DATA/world.xls> (15 abril 2008).

IRIGOYEN, I.; MURO, J.; AZPILIKUETA, M.; APARICIO-TEJO, P.; LAMSFUS, C. Ammonium oxidation kinetics in the presence of nitrification inhibitors DCD and DMPP at various temperatures. **Australian Journal of Soil Research** v. 41, n. 6, p. 1177-1183.

KISSEL, D.E.; CABRERA, M.L.; FERGUSON, R.B. Reactions of ammonia and urea hydrolysis products with soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 1793-1796, 1988.

KNOWLES, R.; BLACKBURN, T.H. Nitrogen isotope techniques. San Diego: Academic Press, 1993. 311p.

LAMMEL, J. Cost of different options available to the farmers: Current situation and prospects. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, Frankfurt, 2005. Proceedings: Paris, International Fertilizer Industry Association, 2005. 9p. CR-ROM.

LANGE, A.; LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. Recuperação do nitrogênio das fontes sulfato e nitrato de amônio pelo milho em sistema semeadura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 123-130, 2008.

LARA CABEZAS, W.A.R.; ALVES, B.J.R. ; CABALLERO, S.S.U.; SANTANA, D.G.de. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade de milho em sistema plantio direto e solo preparado. **Ciência Rural**, v. 34, n. 4, p. 1.005-1.013, 2004.

LARA CABEZAS, W.A.R.; ARRUDA, M.R.; CANTARELLA, H.; PAULETTI, V.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 215-226, 2005.

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

LARA-CABEZAS, W.A.; PADUA, R.V.de. Eficiência e distribuição de nitrogênio aplicado em cobertura na cultura de milho consorciada com *Brachiaria ruziziensis*, cultivada no sistema Santa Fé. **Bragantia**, v.66, n.1, p. 131-140, 2007.

LEITE, G.H.M.N.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; COGO, N.P. Atributos químicos e perfil de enraizamento de milho influenciados pela calagem em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.685-693, 2006.

LOPES, A.S. Manual de fertilidade do solo. Piracicaba: ANDA/POTAFOS, 1989. 156p.

MAI, M.E.M.; CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; SILVEIRA, M.J.; PAVINATO, A.; PAVINATO, P.S. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-preta/milho no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 125-131, 2003.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds). Fertilidade do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-64, 2007.

MALZER, G.L.; KELLING, K.A.; SCHMITT, M.A.; HOEFT, R.G.; RANDALL, G.W. Performance of dicyandiamide in the North Central States. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 20, p. 2117-2136, 1989.

MAR, G.D.; MARCHETTI, M.E.; SOUZA, L.C.F.; GONÇALVES, M.C.; NOVELINO, J.O. Produção do milho safrinha em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Bragantia**, v. 62, p. 267-274, 2003.

MASON, M.G. Effects of dicyandiamide (a nitrification inhibitor) on leaching of nitrogen and growth of cereals. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 27, n. 1, 1987.

MCCARTY, G.W. Modes of action of nitrification inhibitors. **Biology and Fertility of Soils**, v. 29, n. 1, p. 1-9, 1999.

MCCARTY, G.W.; BREMNER, J.M. Laboratory evaluation of dicyandiamide as a soil nitrification inhibitor. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 20, n. 19 e 20, p. 2049-2065, 1989.

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

MULVANEY, R.L. & BREMNER, J.M. A modified diacetyl monoxime method for colorimetric determination of urea in soil extracts. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 10, n. 8, p. 1163-1170, 1979.

MYROLD, D.D. Microbial nitrogen transformations. In: SYLVIA, D.M.; FUHRMANN, J.J.; HARTEL, P.G.; ZUBERER, D.A. (eds). Principles and Applications of Soil Microbiology. Upper Saddle River, Prentice Hall, p. 259-294, 1998.

OVERREIN, L.N.; MOE, P.G. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 31, p. 57-61, 1967.

PASDA, G.; HAHNDEL, R.; ZERULLA, W. Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor Dmpp (3,4 – Dimethylpyrazole Phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops. **Biology and Fertility of Soils**, v. 34, n. 2, p. 85-97, 2001.

PIERZYNSKI, G.M.; THOMAS, S.; VANCE, G.F. Soils and environmental quality. 2.ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 459p.

PÖTTKER, D.; WIETHÖLTER, S. Épocas e métodos de aplicação de nitrogênio em milho cultivado no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 4, p. 1015-1020, 2004.

PRASAD, R.; POWER, J. Nitrification inhibitors for agriculture, health and the environment. **Advances in agronomy**, v. 54, p. 233-281, 1995.

PUTTANNA, K.; NANJE GOWDA, N.M.; PRAKASA RAO, E.V.S. Effect of concentration, temperature, moisture, liming and organic matter on the efficacy of the nitrification inhibitors benzotriazole, o-nitrophenol, m-nitroaniline and dicyandiamide. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 54, p. 251-257, 1999.

RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. 285p.

RAJBANSHI, S.S.; BENCKISER, G.; OTTOW, J.C.G. Effects of concentration, incubation temperature, and repeated applications on degradation kinetics of dicyandiamide (DCD) in model experiments with a silt loam soil. **Biology and fertility of soils**, v. 13, p. 61-64, 1992.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente ExcelTM para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, p.133-137, 1998.

SÁ, J.C.M. Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1996. 23p.

SAHRAWAT, K.L. Factors Affecting Nitrification in Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, n. 9 e 10, p. 1436-1446, 2008.

SAHRAWAT, K.L.; KEENEY, D.R.; ADAMS, S.S. Ability of nitrapyrin, dicyandiamide and acetylene to retard nitrification in a mineral and an organic soil. **Plant and Soil**, v. 101, n. 2, p. 179-182, 1987.

SANGOI, L. ERNANI, P. R., LECH, V. A., RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes, **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 65-70, 2003.

SCHMIDT, E.L. Nitrification in soil. In: STEVENSON, F.J. Nitrogen in agricultural soils. Madison, American Society of Agronomy, p. 253-288, 1982.

SHAVIV, A. Controlled release fertilizers. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, Frankfurt, 2005. Proceedings. Paris, International Fertilizer Industry Association, 2005. 13p. CR-ROM.

SILVA, E. C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G.L.; TRIVELIN, P.C.O.; VELOSO, M.E.C. Utilização do nitrogênio (¹⁵N) residual de coberturas de solo e da uréia pela cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 965-974, 2006.

SILVA, E.C. da; FERREIRA, S.M.; SILVA, G.P.; ASSIS, R.L. de; GUIMARÃES, G.L. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 725-733, 2005.

SILVA, P.S.L.; SILVA, P.I.B. Parcelamento da adubação nitrogenada e rendimento de espigas verdes de milho. **Horticultura Brasileira**, v. 21, n. 2, p. 150-153, 2003.

SIMEK, M. Nitrification in soil – terminology and methodology. **Rostlinná Výroba**, v. 46, p. 385-395, 2000.

SOUZA, J.A.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; VALDERAMA, M. Efeito de doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas (FERTBIO), 28., 2008, Londrina. Resumos. CD-Rom.

SOUZA, L.S.; VELINI, E.D.; MARTINS, D; ROSOLEM, C.A. Efeito alelopático de capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) sobre o crescimento inicial de sete espécies de plantas cultivadas. **Planta daninha**, v.24, n. 4, p. 657-668, 2006.

SUBBARAO, G. V.; RONDON, M.; ITO, O.; ISHIKAWA, T.; RAO, I.M.; NAKAHARA, K.; LASCANO, C.; BERRY, L.W. Biological nitrification inhibition (BNI) - is it a widespread phenomenon? **Plant and Soil**, v. 294, n. 1 e 2, p. 5-18, 2007.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, R.J. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. Soil fertility and fertilizers. New York: Macmillan Publishing Company, 1985. 754p.

TRENKEL, M.E. Improving fertilizer use efficiency: Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997. 151p.

TRIVELIN, P.C.O. O método do traçador isotópico para nitrogênio. http://web.cena.usp.br/apostilas/Trivelin/CEN5747_2008/Apostilas/06MetTra%C3%A7adorN.pdf (02 fevereiro 2009).

ULLMANN'S AGROCHEMICALS, http://media.wiley.com/product_data/excerpt/43/3273160/3527316043.pdf, (22 março 2009).

WARNCKE, D.; BARBER, S. Ammonium and nitrate uptake by corn (*Zea mays*, L.) as influenced by nitrogen concentrations and $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio. **Agronomy Journal**, v. 65, p. 950-954, 1973.

WEISKE, A.; BENCKISER, G.; HERBERT, T. OTTOW, J.C.G. Influence of the nitrification inhibitor 3,4 – Dimethylpyrazole Phosphate (Dmpp) in comparison to Dicyandiamide (Dcd) on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments. **Biology and Fertility of Soils**, v. 34, n. 2, p. 109-117, 2001.

WOLT, J.D. A meta-evaluation of nitrapyrin agronomic and environmental effectiveness with emphasis on corn production in the Midwestern USA. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 69, p. 23-41, 2004.

ZAMAN, M.; NGUYEN, M.L.; BLENNERHASSETT, J.D.; QUIN, B.F. Reducing NH_3 , N_2O and NO_3^- - N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. **Biology and fertility of soils**, v. 44, p. 693-705, 2008.

ZERULLA, W.; BARTH, T.; DRESSEL, J.; ERHARDT, K.; von LOCQUENGIEN, K.H; PASDA, G.; RADLE, M.; WISSEMEIER, A.H. 3,4 – Dimethylpyrazole Phosphate (Dmpp) – a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture – an introduction. **Biology and Fertility of Soils**, v. 34, n. 2, p. 79-84, 2001.

7 ANEXOS

Anexo 1 - Teores de nutrientes nas folhas de milho no florescimento – Assis (SP). Médias dos contrastes comparadas pelo teste F.

Fonte	Época ⁽¹⁾	Dose kg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----					
			K	P	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
Testemunha	-	0	14,9	2,6	3,5	1,6	1,3	6,1	5,6	76,6	27,8	11,8	
UR	S	60	15,7	3,0	4,0	2,0	1,5	6,7	6,1	102,6	29,4	13,9	
		90	14,3	2,9	4,5	2,2	1,7	6,0	6,9	97,8	36,0	15,1	
		120	15,7	3,2	4,8	2,4	2,0	5,6	7,1	101,6	34,4	14,8	
	4F	60	16,6	2,9	4,4	2,0	1,8	6,0	7,2	107,0	36,6	14,9	
		90	16,5	3,2	4,6	2,1	2,0	8,8	8,5	106,4	43,0	19,2	
		120	16,8	3,2	4,2	1,8	2,0	8,3	7,1	103,8	41,4	16,2	
	4F+8F	60	16,9	2,9	4,1	1,8	1,7	15,6	9,2	105,2	54,0	19,0	
		90	16,4	3,1	4,1	1,8	1,7	7,6	8,1	106,6	46,8	18,9	
		120	16,2	3,0	4,0	1,7	1,8	5,6	7,9	98,4	45,6	17,4	
		150	15,2	2,9	4,0	1,8	1,7	7,9	7,7	94,4	39,0	15,9	
	UR+DCD	S	90	14,9	2,9	4,7	2,2	1,8	8,8	8,1	120,2	40,4	18,5
		4F	90	19,4	3,7	4,7	2,2	2,0	5,8	7,8	108,2	34,6	16,2
4F+8F		90	16,9	3,2	4,1	1,9	1,8	5,0	7,8	94,0	47,0	17,5	

Contraste⁽²⁾ / Tratamentos

1. Resposta à dose de N ("4F+8F")	Q*	ns	ns	ns	L**	ns	L*	Q**	L**	L**
2. Resposta à época de aplicação de N ("Semeadura" x "4F" e "4F+8F")	*	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
3. Resposta à época de aplicação de N ("4F" x "4F+8F")	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
4. Resposta à adição de DCD na uréia	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

(1) S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas completamente expandidas)

(2) ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5% respectivamente.

Anexo 2 - Teores de nutrientes nas folhas de milho no florescimento – Votuporanga (SP). Médias dos contrastes comparadas pelo teste F.

Fonte	Época ⁽¹⁾	Dose	K	P	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
		kg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----				-----mg kg ⁻¹ -----						
Testemunha	-	0	18,8	2,8	3,1	1,3	1,3	7,6	5,7	67,0	28,4	14,3	
UR	S	60	19,4	3,1	3,6	1,5	1,6	12,1	7,1	77,8	37,0	17,7	
		90	20,8	3,1	3,3	1,4	1,6	9,3	6,9	73,6	37,4	17,6	
		120	20,0	3,2	3,3	1,4	1,7	11,3	7,4	78,8	42,2	16,9	
	4F	60	19,8	3,1	3,3	1,3	1,6	9,9	6,7	80,0	44,6	18,6	
		90	20,6	3,2	3,4	1,5	1,7	10,1	7,1	80,0	47,8	17,6	
		120	21,3	3,5	3,5	1,5	1,8	9,8	8,0	87,8	46,0	18,6	
	4F+8F	60	19,3	3,1	3,7	1,5	1,7	8,5	7,3	82,4	42,4	16,8	
		90	21,2	3,4	3,2	1,3	1,8	14,7	6,8	83,8	54,0	18,1	
		120	20,9	3,4	3,4	1,4	1,9	12,4	7,4	86,6	52,0	18,2	
		150	20,7	3,3	3,2	1,2	1,7	10,8	7,5	86,8	49,0	21,7	
	UR+DCD	S	90	19,7	3,3	3,2	1,3	1,7	11,1	7,1	79,8	42,8	19,1
		4F	90	21,5	3,5	3,2	1,3	1,9	11,2	8,1	90,0	48,8	22,1
4F+8F		90	20,4	3,4	3,1	1,3	1,8	8,1	7,9	87,2	52,0	19,1	

Contraste⁽²⁾ / Tratamentos

1. Resposta à dose de N ("4F+8F")	Q*	Q**	ns	ns	Q**	ns	Q**	Q**	L**	L**
2. Resposta à época de aplicação de N ("Semeadura" x "4F" e "4F+8F")	**	**	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns
3. Resposta à época de aplicação de N ("4F" x "4F+8F")	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns
4. Resposta à adição de DCD na uréia	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**

(1) S; 4F; 4F+8F: Épocas de aplicação do N (Semeadura; 4 Folhas; 4 Folhas + 8 Folhas completamente expandidas)

(2) ns ; ** ; * : Teste F não significativo para os contrastes; significativo a 1% e significativo a 5% respectivamente.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)