

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EFEITOS DA UREIA COM INIBIDORES DE NITRIFICAÇÃO E
UREASE NA CULTURA DO MILHO**

Fábio Teixeira Lucas
Engenheiro Agrônomo

2016

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EFEITOS DA UREIA COM INIBIDORES DE NITRIFICAÇÃO E
UREASE NA CULTURA DO MILHO**

Fábio Teixeira Lucas

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

2016

Lucas, Fábio Teixeira
L933e Efeitos da ureia com inibidores de nitrificação e urease na cultura do milho / Fábio Teixeira Lucas. -- Jaboticabal, 2016
xiii, 60 p. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2016

Orientador: Edson Luiz Mendes Coutinho

Banca examinadora: Carolina Fernandes, José Eduardo Corá, Takashi Muraoka, Valdeci Orioli Júnior

Bibliografia

1. *Zea mays*. 2. NBPT. 3. DMPP. 4. Estado nutricional. 5. Índice de clorofila. 6. Índice de área foliar. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.811:633.15

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação.
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP.
e-mail: fabiotlucas@msn.com


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: EFEITOS DA UREIA COM INIBIDORES DE NITRIFICAÇÃO E UREASE NA CULTURA DO MILHO

AUTOR: FÁBIO TEIXEIRA LUCAS

ORIENTADOR: EDSON LUIZ MENDES COUTINHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:



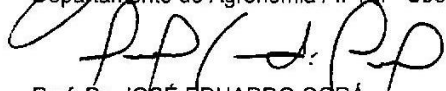
Prof. Dr. EDSON LUIZ MENDES COUTINHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal




Dr. TAKASHI MURAOKA
Departamento de Fertilidade do Solo / CENA/USP - Piracicaba/SP



Prof. Dr. WALDECI ORIOLI JÚNIOR
Departamento de Agronomia / IFTM - Uberaba/MG



Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO CORÁ
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Profa. Dra. CAROLINA FERNANDES
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 25 de outubro de 2016.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

FÁBIO TEIXEIRA LUCAS, natural de Uberaba, Estado de Minas Gerais, Brasil, nasceu em 10 de janeiro de 1987, filho de Isabel Cristina de Lima Teixeira Lucas e Ezio Lopes Lucas. Concluiu o segundo grau (ensino médio) no Colégio Cenecista Dr. José Ferreira, em Uberaba, MG, no ano de 2004. Graduado em Agronomia pelas Faculdades Associadas de Uberaba (FAZU), no ano de 2008, onde defendeu a monografia para conclusão de curso intitulada “Produção e qualidade de híbridos de milho para silagem”, tendo como orientador o Prof. Francisc Henrique Silva. Também é graduado no curso Tecnologia em Processos Gerenciais (Gestão de Agronegócios) pela Universidade de Uberaba (UNIUBE), no ano de 2008, defendendo a monografia “Fontes renováveis de energia”, sob orientação do Prof. M.Sc. Evandro José Rigo. É Especialista em Gestão Ambiental pela UNIUBE, título recebido em 2011, defendendo o trabalho “Biomassa como fonte de energia renovável” sob orientação do Prof. Paulo Henrique Lopes Alves. É, também, Mestre em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Câmpus de Jaboticabal, SP, como Bolsista de Mestrado da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), defendendo a dissertação “Produtividade e qualidade de grãos de canola em função da adubação nitrogenada e sulfatada”, sob a orientação do Prof. Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho, no ano de 2012. Em 2013 iniciou o curso de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) na UNESP/FCAV, Câmpus de Jaboticabal, SP, como Bolsista de Doutorado da CAPES, também sob a orientação do Prof. Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho. No dia 25 de outubro de 2016 obteve o título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), defendendo a tese intitulada “Efeitos da ureia com inibidores de nitrificação e urease na cultura do milho”.

“Se planejarmos para um ano,
devemos plantar cereais!
Se planejarmos para décadas,
devemos plantar árvores!
Se planejarmos para toda a vida,
devemos educar o homem!”

(Kwanstsu, século III a.C.)

Aos meus pais Ezio e Isabel e aos meus irmãos Heloísa e Breno, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e torcendo pelas minhas conquistas!

Aos meus avós João Teixeira (in memoriam) e Cristina, Astromil e Selma (in memoriam), pelos ensinamentos da vida!

Ofereço

A todos os meus amigos, aos professores e à minha família, que muito me incentivaram!

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve comigo!

À minha família, pelo apoio em todos os momentos, sejam eles bons ou ruins!

Aos meus pais Ezio e Isabel e aos meus irmãos Heloísa e Breno!

Aos meus avós João Teixeira (*in memoriam*) e Cristina, Astromil e Selma (*in memoriam*)!

Aos meus padrinhos Elcio, Regina e Vicente!

Aos meus tios-avôs Mário Lacerda e Miguel Teixeira, à minha bisavó Aracy dos Santos e aos meus avós João Teixeira e Selma, que não se encontram mais entre nós, mas que lá de cima estão torcendo pelo meu sucesso!

A todos os professores das Faculdades Associadas de Uberaba (FAZU), que compartilharam suas experiências e conhecimentos durante minha graduação em Agronomia!

Ao meu professor e amigo Dr. José Mauro Valente Paes, pesquisador da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), Uberaba, MG, que me abriu as portas após minha graduação e me guiou à vida acadêmica! Minha eterna gratidão!

Aos demais pesquisadores e funcionários da EPAMIG, pela amizade e troca de conhecimentos!

À CAPES, pela bolsa de doutorado, financiando meus estudos!

Às instituições Cooperativa dos Empresários Rurais do Triângulo Mineiro (CERTRIM), COMPO EXPERT e Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Câmpus de Jaboticabal, SP, pela colaboração na realização do experimento, fornecimentos de materiais, preparo da área e avaliações dos tratamentos experimentais!

Ao meu professor orientador Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho, por me acolher como aluno e cujas orientações foram de fundamental importância para que eu concluísse os cursos de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) e Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal), e também pela sua paciência, dedicação e amizade!

Aos professores da UNESP/FCAV Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, Dra. Célia Regina Paes Bueno, Dra. Durvalina Maria Mathias dos Santos, Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho, Dr. Itamar Andrioli, Dr. João Antônio Galbiatti, Dr. José Carlos Barbosa, Dr. José Eduardo Corá, Dr. José Marques Júnior, Dr. Pedro Luís da Costa Aguiar Alves, Dr. Renato de Mello Prado, Dra. Tereza Cristina Tarlé Pissarra e Dr. William Natale, pelos conhecimentos concedidos nas disciplinas cursadas!

Aos professores Dra. Carolina Fernandes, Dr. José Eduardo Corá e Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz, membros da banca examinadora do exame geral de qualificação, pelas sugestões apresentadas!

Aos professores Dra. Carolina Fernandes, Dr. José Eduardo Corá, Dr. Takashi Muraoka e Dr. Valdeci Orioli Júnior, membros da banca da defesa da tese, pelas importantes contribuições!

À Cláudia Campos Dela Marta, Técnica do Laboratório do Departamento de Solos e Adubos pelo carinho, cuidado e capricho nas análises químicas e pela amizade!

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal)!

A todos os meus amigos, pelo companheirismo e amizade!

Enfim, aos amigos da UNESP/FCAV do Curso de Pós-Graduação em Agronomia!

Obrigado e abraços a todos!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xii
SUMMARY	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental.....	14
3.2 Dados de precipitação e temperatura média do ar	15
3.3 Avaliações	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5 CONCLUSÃO	45
6 REFERÊNCIAS	46

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Análise granulométrica e análise química para fins de fertilidade do solo na camada de 0 a 0,20 m de profundidade.....	14
Tabela 2. Índice de clorofila na folha em diferentes estádios fenológicos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.....	21
Tabela 3. Concentração de N na folha em diferentes estádios fenológicos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.....	22
Tabela 4. Índice de área foliar no estágio fenológico R2 em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015	27
Tabela 5. Concentração de N na parte aérea no estágio fenológico R6 e nos grãos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.....	29
Tabela 6. Massa seca total e acúmulos de N na parte aérea e nos grãos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.....	30
Tabela 7. Altura da planta (AP), altura de inserção da 1ª espiga (AE) e diâmetro do colmo (DC) – estágio fenológico R3 – em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.....	33
Tabela 8. Comprimento da espiga (CE), diâmetro da espiga sem palha (DESP), número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), número de grãos por espiga (NGE), massa da espiga sem palha (MESP) e massa de grãos por espiga (MGE) em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – ano agrícola 2013/2014.....	36

Tabela 9. Comprimento da espiga (CE), diâmetro da espiga sem palha (DESP), número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), número de grãos por espiga (NGE), massa da espiga sem palha (MESP) e massa de grãos por espiga (MGE) em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – ano agrícola 2014/2015.....	37
Tabela 10. Massa de 1.000 grãos e produtividade de grãos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015	38
Tabela 11. Eficiência agronômica em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.....	43

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Dados diários de precipitação e temperatura média do ar no período experimental – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015. 1. Adubação nitrogenada e semeadura do milho; 2. Aplicação do N em cobertura; 3, 4 e 5. Análise foliar e avaliação do índice de clorofila (estádios fenológicos V6, V10 e R1, respectivamente); 6. Avaliação da área foliar; 7. Avaliações das características morfológicas das plantas; 8. Coleta de plantas inteiras para avaliações de acúmulos de massa seca e N na parte aérea; 9. Colheita e coleta de espigas para avaliações de produtividade de grãos e componentes da produção, respectivamente.....	16
Figura 2. Índice de clorofila na folha em função de doses de N em diferentes estádios fenológicos da cultura do milho. A) Ano agrícola 2013/2014; B) Ano agrícola 2014/2015	23
Figura 3. Concentração de N na folha em função de doses de N em diferentes estádios fenológicos da cultura do milho. A) Ano agrícola 2013/2014; B) Ano agrícola 2014/2015	23
Figura 4. Produção relativa de grãos de milho em função do índice de clorofila e da concentração de N na folha – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015. A) Estádio V6; B) Estádio V10; C) Estádio R1	24
Figura 5. A) Índice de área foliar em função de doses de N; B) Produção relativa de grãos de milho em função do índice de área foliar – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015	28
Figura 6. Massa de 1.000 grãos em função de doses de N	39
Figura 7. A) Produtividade de grãos de milho em função de doses de N e tratamentos da ureia; B) Produção relativa de grãos de milho em função de doses de N – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.....	39
Figura 8. Eficiência agrônômica em função de doses de N – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.....	44

EFEITOS DA UREIA COM INIBIDORES DE NITRIFICAÇÃO E UREASE NA CULTURA DO MILHO

RESUMO – Para obtenção de altas produtividades de milho, é necessário adequado fornecimento de fertilizante nitrogenado à planta. Para isso, é importante saber qual fonte utilizar para evitar perdas por lixiviação e volatilização. Portanto, surgiram no mercado fertilizantes chamados estabilizados que apresentam inibidores de nitrificação e urease. É importante, também, conhecer a época de aplicação desses fertilizantes. Assim, objetivou-se avaliar os efeitos da ureia tratada com inibidores de nitrificação e urease no desenvolvimento da planta e na produtividade de grãos da cultura do milho. O experimento foi realizado no município de Jaboticabal, SP, em Latossolo Vermelho distrófico, textura média, utilizando-se o híbrido Dow 2B710, durante dois anos agrícolas (2013/2014 e 2014/2015). Foram utilizadas quatro doses de N (0, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹); três tratamentos da ureia (ureia com inibidor de urease: [N-(N-butil) tiofosfórico triamida] – “NBPT”; ureia com inibidor de nitrificação: (3,4-dimetilpirazol-fosfato) – “DMPP” e; ureia convencional) e duas épocas de aplicação (dose total aplicada na semeadura e; 30 kg ha⁻¹ na semeadura e o restante em cobertura, no estágio fenológico V4). Tratamentos da ureia e épocas de aplicação utilizadas não promoveram diferenças significativas nas variáveis estudadas em relação à ureia convencional. Avaliações do índice de clorofila com clorofilômetro e concentração de N na folha em estádios iniciais podem possibilitar medidas de correção de deficiência caso sejam detectados baixos teores.

Palavras-chave: *Zea mays*, NBPT, DMPP, Estado nutricional, Índice de clorofila, Índice de área foliar

EFFECTS OF UREA WITH NITRIFICATION AND UREASE INHIBITORS IN MAIZE CROP

SUMMARY – In order to obtain high maize yield, it is required an adequate supply of N fertilizer to the crop. For this, it is important to know what source to use to avoid losses by leaching and volatilization. Thus, fertilizers known as stabilized with nitrification and urease inhibitors have emerged in the market. It is important also to know the application time of these fertilizers. So, aiming to study the effects of urea treated with nitrification and urease inhibitors on plant development and grains yield of maize crop. The experiment was carried out in Jaboticabal, SP, Brazil, in a Haplustox, using the Dow 2B710 hybrid, during two agricultural years (2013/2014 and 2014/2015). Four N rates (0, 50, 100 and 200 kg ha⁻¹); three urea treatments (urea with urease inhibitor: [N-(N-butyl) thiophosphoric triamide] – “NBPT”; urea with nitrification inhibitor: (3,4-dimethylpyrazole-phosphate) – “DMPP” and; conventional urea) and two application times (total rate applied at sowing and; 30 kg ha⁻¹ at sowing and remainder topdressed at developmental stage V4). Urea treatments and application times did not promote significant differences in the variables studied in relation to conventional urea. Evaluation of chlorophyll index with chlorophyll meter and N concentration in the leaf at initial stages may allow deficiency correction measures if low levels are detected.

Key-words: *Zea mays*, NBPT, DMPP, Nutritional status, Chlorophyll index, Leaf area index

1 INTRODUÇÃO

A adubação nitrogenada é necessária para altas produtividades de grãos de milho, pois os solos em geral não suprem a demanda de N da cultura (PÖTTKER; WIETHÖLTER, 2004), que é altamente responsiva a esse nutriente.

Segundo Trenkel (2010), as principais formas de absorção de N pelas plantas são amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), que correspondem 2 a 3% do N total do solo. No Brasil, as principais fontes de N utilizadas são ureia, nitrato de amônio e sulfato de amônio (CANTARELLA; MARCELINO, 2008). Dentre esses, a ureia é a mais utilizada por possuir menor custo no mercado. No entanto, tem sido estimado que 5 a 30% do N nessa fonte são perdidos na forma de amônia (NH_3) volatilizada quando não incorporada ao solo (CANTARELLA, 2007). Estima-se que as culturas de cereais aproveitam cerca de 30 a 50% do fertilizante nitrogenado aplicado (GRANT, 2005). Devido à dinâmica do N no sistema solo-planta-atmosfera, o aproveitamento do N pelo milho fornecido na forma de fertilizante é baixo e raramente o aproveitamento do N fertilizante excede 60% do N aplicado (DUETE et al., 2008).

Para melhorar a eficiência da adubação nitrogenada, existe a possibilidade de uso da ureia com aditivos, os quais podem inibir temporariamente a hidrólise da ureia e a ação de bactérias nitrificantes, sendo chamados de fertilizantes estabilizados (CANTARELLA; MARCELINO, 2008).

Como exemplos desses fertilizantes nitrogenados estabilizados destacam-se a ureia com inibidor de urease [N-(N-butil) tiofosfórico triamida], “NBPT”, e a ureia com inibidor de nitrificação (3,4-dimetilpirazol-fosfato), “DMPP”. Cantarella et al. (2008) observaram que o uso de NBPT proporcionou reduções de 15 a 78% nas perdas de N por volatilização. Segundo Zerulla et al. (2001), o DMPP adicionado à ureia em doses entre 0,5 e 1,5 kg ha⁻¹ é suficiente para inibir o processo de nitrificação por 4 a 10 semanas. Esse inibidor apresenta baixa mobilidade no solo e tende a permanecer na região de aplicação, não estando sujeito à lixiviação.

No norte do Estado de São Paulo a chuva concentra-se entre os meses de novembro e março, podendo contribuir para a lixiviação do N. Assim, com o intuito de aumentar a eficiência de utilização do N pela planta de milho, é recomendado o

parcelamento da adubação nitrogenada, sendo comum a aplicação na semeadura de parte do N recomendado e o restante em cobertura, quando as plantas apresentam de 4 a 8 folhas completamente desenroladas (ESCOSTEGUY; RIZZARDI; ARGENTA, 1997). Entretanto, alguns experimentos conduzidos em solos argilosos têm evidenciado que é indiferente executar a aplicação única em pré-semeadura (semeadura) ou aplicação parcelada (WOLSCHICK et al., 2003; COUTINHO NETO et al., 2013). Assim, a aplicação única é mais interessante, uma vez que os custos de produção da cultura são menores (TRENKEL, 2010).

Assim, o manejo correto da adubação nitrogenada é essencial para aumentar a eficiência da utilização do N, pois se trata de nutriente que pode ser facilmente perdido por lixiviação e volatilização no sistema solo-planta-atmosfera. A respeito da eficiência desses fertilizantes estabilizados, objetivou-se avaliar os efeitos da ureia tratada com inibidores de nitrificação e urease (DMPP e NBPT, respectivamente) no desenvolvimento da planta e na produtividade de grãos da cultura do milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

De acordo com Epstein e Bloom (2006), nenhuma deficiência é tão drástica em seus efeitos quanto a de N, cujas principais características são clorose generalizada, hábito estiolado e crescimento retardado e lento. Ainda segundo os mesmos autores, as partes mais maduras da planta são as primeiras a se tornarem afetadas, pois o N transloca-se de regiões velhas para as mais jovens, que crescem ativamente. Esse nutriente é integrante de todos os aminoácidos, ácidos nucleicos e clorofila, além de outros compostos. Assim, as principais reações bioquímicas em plantas e microrganismos envolvem a presença de N, o que o torna um dos elementos absorvidos em maiores quantidades pelas plantas cultivadas (CANTARELLA, 2007).

O N é um dos nutrientes que constituem a molécula de clorofila, sendo a mesma o pigmento responsável pela fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2010). Devido a isso, sempre que houver diminuição desse nutriente nos sistemas de cultivo, as plantas poderão apresentar coloração verde mais claro devido à quantidade menor desse pigmento (MARSCHNER, 2012), ocasionando um estado de deficiência e, conseqüentemente, diminuição da produção. O crescimento das plantas é condicionado principalmente à absorção de luz, o que pode ser afetado pela baixa expansão celular e o desenvolvimento das plantas gerado por uma quantidade insuficiente de água e de nutrientes (KUNZ et al., 2007; SANGOI et al., 2011). O N participa da constituição de aminoácidos e proteínas e é essencial nos processos de absorção iônica, fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular (MALAVOLTA, 2006).

São raros os solos que possuem N suficiente para o desenvolvimento das plantas. Segundo Furtini Neto et al. (2001), esse nutriente possui uma dinâmica complexa devido à grande mobilidade no solo e diversificadas transformações em reações químicas e biológicas, podendo ocasionar perdas severas no sistema.

Em se tratando de reações químicas e biológicas, a disponibilidade de N no solo é proveniente de três processos biológicos: mineralização, imobilização e desnitrificação. Esses processos ocorrem devido à decomposição de materiais

orgânicos pela população microbiana do solo, além de perdas por processos de natureza físico-químicos, como a volatilização de NH_3 e a lixiviação de NO_3^- (AITA; GIACOMINI, 2007). A volatilização é definida como a transformação do NH_4^+ em NH_3 pela ação da enzima urease, seguida da transferência da NH_3 gasosa do solo para a atmosfera (MARTHA JÚNIOR et al., 2004). Já a lixiviação ocorre devido à predominância de cargas negativas no solo, ou pelo menos nas camadas superficiais nos solos tropicais, e a baixa interação química do NO_3^- com os minerais do solo fazendo com que o mesmo possa lixiviar, podendo contaminar águas superficiais ou até mesmo o lençol freático (CANTARELLA, 2007). Devido a isso, tais problemas podem ser evitados com práticas de manejo apropriadas, ou seja, adequação de dose, fonte e época correta de aplicação (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009). Segundo Barbieri et al. (2008), a eficiência de utilização do N é variável com a dose empregada, sendo menor na presença das doses mais elevadas.

A adubação nitrogenada deve levar em conta a exigência da cultura, o fornecimento do nutriente pelo solo, o período ou períodos de maior necessidade, as características do adubo nitrogenado e as suas transformações no solo (MALAVOLTA, 2006). De acordo com Stute e Posner (1995), para o máximo aproveitamento do N é importante que a liberação do nutriente ocorra em sincronia com a demanda do elemento pela respectiva cultura. No entanto, quando utilizado em quantidades excessivas ou condições desfavoráveis, o N pode ser perdido e, ao ser transferido para outros locais ou ecossistemas, pode-se tornar poluente de águas subterrâneas, superficiais e da atmosfera (CANTARELLA, 2007), além de onerar o custo de produção da cultura do milho (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; FRYE, 2005).

Os fertilizantes têm como objetivo fornecer nutrientes para as plantas visando aumentar ou manter a produtividade de determinada cultura. Entretanto, qualquer fertilizante, seja na forma natural, inorgânica ou orgânica, pode prejudicar o meio ambiente quando mal utilizado (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009). Devido a isso, a indústria de fertilizantes enfrenta um desafio contínuo para aumentar a eficiência de seus produtos e minimizar qualquer impacto ambiental, principalmente

de fertilizantes nitrogenados, que estão sujeitos a perdas para o ambiente (TRENKEL, 1997).

A maioria dos fertilizantes nitrogenados utilizados nas mais variadas culturas é solúvel em água como, por exemplo, ureia, sulfato de amônio e nitrato de amônio. Essas fontes liberam rapidamente o nutriente no solo nas formas prontamente assimiláveis pelas plantas (NO_3^- e NH_4^+) que, também, são as formas mais suscetíveis a perdas (CANTARELLA; MARCELINO, 2008).

A ureia é a fonte de N mais barata e mais utilizada em todo o mundo. No entanto, nos sistemas agrícolas têm sido estimados que 5 a 30% do N nessa fonte são perdidos em NH_3 volatilizada quando não incorporada ao solo, sendo essas quantificações pouco precisas e exatas (CANTARELLA, 2007). Estima-se, também, que as culturas de cereais aproveitam cerca de 30 a 50% do N do fertilizante aplicado (GRANT, 2005). Segundo trabalho de alguns autores (ALVES et al., 2006; GAVA et al., 2006; DUETE et al., 2008), devido à dinâmica do N no sistema solo-planta-atmosfera, o aproveitamento do mesmo pelo milho fornecido na forma de fertilizante é baixo e raramente o aproveitamento do N fertilizante excede 60% do N aplicado.

Porém, segundo Cantarella e Marcelino (2008), em solos ácidos a incorporação da ureia a uma profundidade de no mínimo 0,05 m pode ser suficiente para diminuir as perdas e fazer com que o N, oriundo da sua hidrólise, permaneça na forma estável de NH_4^+ . Conforme Sangoi et al. (2003), a incorporação desse fertilizante pode diminuir as perdas de N por volatilização de NH_3 mas, por outro lado, não elimina as perdas de NO_3^- por lixiviação, pois a presença de NH_4^+ possibilita o início do processo de nitrificação no solo. De acordo com Cantarella (2007), além de NO_3^- , íons de hidrogênio (H) no solo são liberados pelo processo de nitrificação, contribuindo significativamente na acidificação dos solos agrícolas, principalmente em solos que foram adubados com fontes nitrogenadas amoniacais. Também, para diminuir essas perdas de N, Raij et al. (1996) recomendam o parcelamento do N e que o fornecimento desse nutriente seja feito antes da maior demanda das plantas e quando essas já apresentem o sistema radicular desenvolvido o suficiente para absorver o referido nutriente.

Segundo Basso e Ceretta (2000), a aplicação do N em única época (em pré-semeadura ou na semeadura) pode resultar em acúmulo de $N-NO_3^-$ no solo nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura do milho, pois na fase inicial a demanda por esse nutriente é menor. Já no estágio de 4 a 8 folhas completamente desenroladas, para a aplicação do N em cobertura, a absorção de N pelas plantas é mais intensa. Entretanto, no Brasil, trabalhos têm destacado a importância da aplicação de todo o N recomendado para a cultura do milho antes ou no momento da semeadura, objetivando aumentar a disponibilidade desse nutriente nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, reduzir o efeito da imobilização de N pelos microrganismos do solo ao decomporem resíduos culturais de alta relação C/N (SÁ, 1996; YAMADA, 1996; PÖTTKER; WIETHÖLTER, 2004).

Nos estádios iniciais da cultura do milho, apesar da exigência nutricional ser pequena, grandes concentrações de N são necessárias próximas ao sistema radicular para proporcionar maior desenvolvimento da planta, pois é neste período que todos os órgãos da mesma são diferenciados (MENGEL; BARBER, 1974; RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993; VARVEL; SCHEPERS; FRANCIS, 1997); nessa fase inicial, a ocorrência de deficiência de N pode reduzir o número de óvulos nos primórdios da espiga (SCHREIBER; STANBERRY; TUCKER, 1988). Esse nutriente pode afetar o crescimento, a morfologia e a distribuição do sistema radicular no perfil do solo (KRISTENSEN; THORUP-KRISTENSEN, 2004; HODGEN et al., 2009), indicando que sua deficiência pode reduzir o rendimento de grãos da cultura. No entanto, em alguns trabalhos não foi observada diferença na produtividade de grãos de milho entre a aplicação total da dose de N em pré-semeadura e o parcelamento da mesma em cobertura (LARA CABEZAS; COUTO, 2007; BERTOLINI et al., 2008; COUTINHO NETO et al., 2013); porém, em anos com elevada precipitação, no período logo após a aplicação do N em pré-semeadura verificou-se redução na produtividade de milho (CANTARELLA; DUARTE; ANDRADE, 2005; SILVA et al., 2005a).

Segundo Amado, Mielniczuk e Aita (2002), o N é o nutriente requerido em maior quantidade pela cultura do milho. Quando as condições climáticas são favoráveis, essa cultura pode requerer doses superiores a 150 kg ha^{-1} desse

nutriente para obtenção de boa produtividade de grãos, justificando a necessidade do uso de fertilizantes nitrogenados.

Vários trabalhos têm mostrado a importância do fornecimento de N no aumento da produtividade de grãos de milho (VELOSO et al., 2006; DUETE et al., 2008; FARINELLI; LEMOS, 2012). Coelho (2007) relata que, no Brasil, a dose média de N aplicada em lavouras comerciais é de 60 kg ha⁻¹, muito inferior às da China e dos Estados Unidos, que correspondem a 130 e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Para altas produtividades e em cultivos de sequeiro, as recomendações são de 60 a 100 kg ha⁻¹ de N em cobertura e, em cultivos irrigados, de 120 a 160 kg ha⁻¹ (GROSS; VON PINHO; BRITO, 2006; PAVINATO et al., 2008). Resultados vêm demonstrando que o potencial produtivo da cultura está relacionado à aplicação de doses de N que variam de 90 a 180 kg ha⁻¹ (GROSS; VON PINHO; BRITO, 2006; VELOSO et al., 2006; GOMES et al., 2007). Entretanto, já foram observadas respostas significativas com doses acima de 200 kg ha⁻¹ de N em cobertura (OHLAND et al., 2005; PAVINATO et al., 2008). Além disso, é importante destacar que os híbridos e variedades de milho existentes no mercado demandam quantidades diferentes desse nutriente de acordo com seu potencial (FERNANDES et al., 2005). No Estado de São Paulo, para obter produtividades de grãos superiores a 8,0 Mg ha⁻¹, dependendo da classe de resposta ao N a dose recomendada desse nutriente pode variar de 50 a 140 kg ha⁻¹ em cobertura (CANTARELLA; RAIJ; CAMARGO, 1996).

O aumento da produtividade de grãos com a adição de N está relacionado com a influência desse nutriente na área foliar das plantas (OSCAR; TOLLENAR, 2006; VELOSO et al., 2009), no número de grãos por espiga (MAYER; ROSSINI; MADDONI, 2012) e na massa de 100 grãos (VELOSO et al., 2006; FARINELLI; LEMOS, 2012).

De acordo com Geisseler et al. (2012), o fornecimento adequado de N é fundamental para se alcançar altas produtividades em um intenso sistema de produção. No entanto, fontes nitrogenadas estão sujeitas a perdas e possuem elevado custo (CONNELL et al., 2011), uma vez que perdas de N podem ser consideradas danosas ao ambiente. Isso pode se tornar um problema quanto à

qualidade do ar, da água e do solo cultivado (SILVEIRA; HABY; LEONARD, 2007; CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009).

Assim, a implementação de estratégias de mitigação de NH_3 é crucial para reduzir o impacto econômico e ambiental associado às perdas de NH_3 com a aplicação de ureia. Inibidores da atividade da urease e adição de água ao solo têm sido propostas como forma de reduzir a emissão de NH_3 proveniente de aplicações de fertilizantes (SANZ-COBENA et al., 2011). Altas temperaturas e alta atividade biológica na superfície do solo promovem a rápida hidrólise da ureia em NH_3 e carbonato (CO_3^{2-}) devido à presença da enzima urease no solo, levando a grandes perdas de NH_3 (BYRNES; FRENEY, 1995; CANTARELLA et al., 2008).

Segundo Grant (2005), inibidores de urease têm maior benefício na redução de volatilização em situações em que é difícil a incorporação do fertilizante ou em solos com elevada atividade da urease por causa da falta de cultivo ou à acumulação de material orgânico. Uma formulação comercial chamada Agrotain® está disponível no mercado para mistura à ureia previamente fabricada. Essa formulação contém uma substância inibidora de urease que vem sendo considerada como uma das mais promissoras para a maximização do uso do N da ureia em sistemas agrícolas, cujo nome é [N-(N-butil) tiofosfórico triamida], “NBPT”.

De acordo com Cantarella e Marcelino (2008), os inibidores disponíveis são classificados como reagentes que interagem com os grupos sulfidrílo, hidroxamatos e análogos estruturais de ureia, que inibem a ação da urease, competindo para o local ativo da enzima. Este último grupo inclui o NBPT, que é um aditivo que protege a ureia aplicada à superfície da degradação e perda por volatilização de NH_3 , sendo considerado produto com chances mais promissoras de uso. O NBPT inibe a degradação enzimática da ureia pela ação da urease por um período de 10 a 14 dias, em que é posteriormente degradado nos seus elementos constitutivos, N, P e S.

Cantarella et al. (2008) observaram que o uso de NBPT proporcionou reduções de 15 a 78% nas perdas por volatilização dependendo das condições climáticas nos dias posteriores à aplicação de N. Segundo Li-Min et al. (2010), o uso de NBPT em uma fonte nitrogenada aumenta significativamente o rendimento das culturas, diminui a concentração de NO_3^- no solo e melhora a eficiência de utilização

de N. No entanto, em milho, Okumura et al. (2013a) observaram respostas semelhantes em relação à eficiência de utilização, eficiência de recuperação, eficiência agrônômica e eficiência fisiológica quando utilizada fonte de N com NPBT e ureia convencional. Em trigo, Zaman, Nguyen e Blennerhassett (2010) verificaram aumento de 11% na produção ao se utilizar dose de 300 kg ha⁻¹ de ureia com NPBT em comparação à mesma dose de ureia convencional. Na cultura do milho, Schlegel, Nelson e Sommers (1986) observaram que os teores de N no tecido vegetal com o uso do NPBT foram de 28,7 e 28,2 g kg⁻¹ de N na concentração de NPBT a 2,0 e 0,5%, respectivamente, e a ureia foi de 25,6 g kg⁻¹ de N, refletindo em aumento da produtividade pelo uso do inibidor e do aumento da dose.

Entretanto, caso não ocorra precipitação suficiente para incorporar o N ao solo, as perdas de N podem ser da mesma ordem que quando utilizada ureia convencional (CANTARELLA et al., 2008). Devido a isso, o melhor aproveitamento do fertilizante nitrogenado é pelo conhecimento da melhor época e dose de N a ser disponibilizado para a planta. Segundo Okumura et al. (2013b), para que isso ocorra se faz necessária metodologia para informar precocemente o estado nutricional da cultura, possibilitando intervenção em um estágio que ainda ocorra resposta econômica, no caso de adubação em cobertura. Esses autores verificaram que a dose de 145,18 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia tratada com NPBT aplicada em cobertura no estágio fenológico V4 de desenvolvimento do milho proporcionou máximo rendimento de 13.288,26 kg ha⁻¹ de grãos, enquanto que a dose de máxima eficiência econômica foi obtida com a aplicação de 118,21 kg ha⁻¹ de N. Nesse experimento, a folha F6 (6ª folha contando-se de baixo para cima), coletada aos 38 dias após a emergência (estádio fenológico V9), foi considerada como o melhor tecido para avaliação do estado nutricional do N e teor de clorofila.

O teor de clorofila na folha é utilizado para predizer o nível nutricional de N em plantas, devido ao fato de a quantidade desse pigmento relacionar-se positivamente com o teor de N na planta (SMEAL; ZHANG, 1994; ARGENTA et al., 2001). De acordo com Argenta (2001), têm sido propostos alguns métodos para avaliar o nível de N na planta de milho, porém alguns deles apresentam como desvantagens ocupar muito tempo e trabalho não possibilitando a adequada correção da deficiência do nutriente no mesmo ano agrícola. Devido a isso, o desenvolvimento

de medidor portátil de clorofila, cujas leituras são feitas instantaneamente sem necessidade de destruir a folha, surge como nova técnica para avaliar o nível de N na planta. Esse autor observou que, para diagnóstico do nível de N na planta, leituras no clorofilômetro acima de 52,1; 55,3 e 58,0, respectivamente para os estádios fenológicos V6, V10 e R1, representam nível adequado de N.

Também, fertilizantes nitrogenados com inibidores de nitrificação, os quais podem manter o N amoniacal (NH_4^+) no solo por períodos mais prolongados, correspondem a alternativas tecnológicas disponíveis na atualidade, evitando lixiviação do N nítrico (MAÇÃS, 2008). A lixiviação, geralmente de NO_3^- , é uma das vias de perda de N mais importantes, principalmente em climas úmidos, resultando em consequências econômicas e ambientais indesejáveis. A inibição da nitrificação pode retardar as perdas por lixiviação e desnitrificação e melhorar as consequências ecológicas frequentemente associadas à adubação nitrogenada e uso de esterco animal (FRYE, 2005).

Segundo Cantarella (2007), os inibidores de nitrificação caracterizam-se por reduzir a taxa desse referido composto e inibir a atividade de bactérias (*Nitrosomonas*), bloqueando a transformação de NH_4^+ em nitrito (NO_2^-) e retardando por algum tempo as perdas por lixiviação. Assim, a segunda fase da nitrificação não ocorreria, pois faltaria NO_2^- para se oxidar a NO_3^- .

De acordo com McCarty (1999), esses inibidores de nitrificação afetam a atividade da enzima amônia monoxigenase (AMO), que é uma proteína que compõe a membrana das bactérias *Nitrosomonas*. A NH_3 se liga ao sítio ativo dessa enzima e se oxida a hidroxalamina. Assim, os inibidores de nitrificação têm afinidade pelo mesmo sítio ativo dessa enzima e, por competição, se ligam a esse sítio ativo inibindo o processo da nitrificação.

Vários produtos químicos foram patenteados como inibidores de nitrificação, mas poucos têm provado eficiência tanto agronomicamente quanto economicamente. Os inibidores mais usados e comercializados com sucesso são a nitrapirina, a dicianodiamida (DCD) e o 3,4-dimetilpirazol-fosfato (DMPP) (FRYE, 2005).

O primeiro inibidor de nitrificação a ser aprovado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) foi a nitrapirina, fabricado pela Dow

Chemical Company e comercializado como N Serve[®]. A fabricante recomenda que fertilizantes com esse inibidor devem ser incorporados ao solo devido à propriedade volátil da nitrapirina sendo, portanto, uma restrição ao seu uso em sistema de plantio direto. Já a DCD é um amido orgânico solúvel em água, que é tanto fonte de liberação lenta de N quanto inibidor de nitrificação. A sua composição é $C_2N_4H_4$ e contém pelo menos 65% de N. É um grão fino, não higroscópico, pó cristalino, que é facilmente incorporada em fertilizantes sólidos, solução ou suspensão, mas não foi oficialmente aprovada pela USEPA como inibidor de nitrificação até final de 1990, porém foi usada na Europa e pesquisada como inibidor de nitrificação nos Estados Unidos muito antes. O mais recente inibidor de nitrificação no mercado é o DMPP, desenvolvido pela BASF na Alemanha, e diversos experimentos têm indicado que é altamente eficaz, sendo facilmente incorporado em fertilizantes granulados e não apresenta nenhum motivo de preocupações ambientais (FRYE, 2005).

Segundo Zerulla et al. (2001), o DMPP apresenta baixa toxidez e, com isso, boa tolerância pelas plantas, sendo recomendado na dose de 1% sobre a quantidade de $N-NH_4^+$ presente na fonte nitrogenada. Assim, doses entre 0,5 e 1,5 $kg\ ha^{-1}$ desse inibidor, dependendo da quantidade de N aplicado, são suficientes para inibir o processo de nitrificação pelo período de 4 a 10 semanas em locais de clima temperado. Ainda de acordo com esses autores, esse inibidor apresenta baixa mobilidade no solo e tende a permanecer na região de aplicação, não estando sujeito à lixiviação. Azam et al. (2001), em experimento realizado em condições de laboratório, verificaram que após dez dias de incubação 80% do DMPP permaneceu em um raio de, no máximo, 5 mm da região de aplicação, ao contrário do N amoniacal que se difunde mais rapidamente no solo.

Porém, Irigoyen et al. (2003), em experimentos realizados em condições de laboratório, observaram que o DMPP tem eficiência reduzida em altas temperaturas, apresentando efeito inibitório de uma semana, um mês e acima de três meses quando submetido, respectivamente, à 30, 20 e 10°C. Já em condições de campo, Di e Cameron (2004) observaram degradação microbológica dos inibidores de nitrificação no solo, quando em altas temperaturas.

Em condições de campo, no Brasil, em alguns trabalhos com DMPP não têm apresentado retorno econômico em relação a uma fonte sem esse inibidor. Em

experimentos realizados por Buzetti, Perez e Andreotti (2007) e Souza et al. (2008) em Latossolo Vermelho distrófico não foram observados incrementos na produtividade de grãos de milho. De acordo com Barth, von Tucher e Schmidhalter (2001), a eficiência desse inibidor é maior em solos arenosos, pois tende a ser adsorvido à fração argila do solo. No entanto, segundo Frye (2005), incrementos na produtividade ocorrem somente quando as condições ambientais não levam a perdas de N por lixiviação ou desnitrificação e a falta desse nutriente resulte em deficiência nutricional para determinada cultura. Tal fato, porém, pode não acontecer em condições de média ou baixa resposta ao nutriente ou em situações onde as doses aplicadas são maiores do que as necessidades da cultura.

Por outro lado, em relação à nitrapirina, Christensen e Huffman (1992), por meio de vários experimentos com milho em campo, demonstraram que é possível aumentar a eficiência de uso do N quando ele é aplicado em pré-semeadura. Em seis anos de estudo 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 nitrogenada utilizadas (90, 134 ou 179 kg ha⁻¹ de N).

Devido a isso, a utilização desses fertilizantes pode reduzir o número de adubações feitas durante o ciclo de determinada cultura reduzindo, assim, os custos de produção e as perdas por volatilização e lixiviação (ROSSA, 2008). De acordo com Dobermann (2005), quantificar a eficiência de utilização de N na agricultura é tarefa difícil devido, principalmente, à variação dos resultados encontrados nas pesquisas. A utilização de tecnologias para o melhoramento de fertilizantes pode contribuir para aumentar a eficiência de utilização do N. De acordo com Hall (2005), esses fertilizantes foram definidos pela Associação Americana de Agentes para o Controle de Nutrientes de Plantas (AAPFCO) como “Fertilizantes com Eficiência Aumentada” (*Enhanced-Efficiency Fertilizers*).

A ausência de resultados consistentes sobre a produtividade e o custo dos inibidores é responsável pelo baixo uso desses produtos. No Brasil, ainda é pouco pesquisado o uso desses fertilizantes em relação aos países de clima temperado, sendo necessária a condução de experimentos em condições edafoclimáticas tropicais, regiões que apresentam grande potencial para produção de grãos, como o milho. Porém, mesmo ainda sendo pouco utilizados, há interesse em produtos com

essas características, devido à possibilidade de diminuir as perdas de N por lixiviação e volatilização, diminuindo a necessidade de parcelamentos da dose recomendada.

Esse tipo de tecnologia pode ser de grande valia no Brasil, principalmente por se tratar de solos de clima tropical que estão em locais de altos índices pluviométricos concentrados em uma parte do ano (primavera/verão), onde a eficiência de uso do nitrogênio é relativamente baixa associada a perdas significativas. Devido a isso, é importante a realização destes trabalhos para estabelecer relações custo-benefício, assim como conhecer a eficiência agrônômica da adubação validando, dessa forma, a utilização desse tipo de fertilizante.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi conduzido, em condições de campo, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção (FEPE) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Câmpus de Jaboticabal, São Paulo, nos anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015. A posição geográfica é 21°13'52" de latitude Sul e 48°16'58" de longitude Oeste, com altitude de 619 m do nível do mar. O clima é subtropical megatérmico (Aw), ou seja, verão úmido e inverno seco, e temperatura média do ar de 22°C, pelo critério de classificação climática de Köppen (1936).

A área experimental apresenta relevo suave e solo classificado, segundo critérios da EMBRAPA (2013), como Latossolo Vermelho distrófico textura média. Os atributos físicos e químicos do solo da área experimental (Tabela 1) foram avaliados na camada de 0 a 0,20 m de profundidade, antes da instalação do experimento. As análises químicas do solo foram realizadas empregando-se métodos descritos por Raij et al. (2001); a análise granulométrica foi realizada pelo método de Day (1965).

Tabela 1. Análise granulométrica e análise química para fins de fertilidade do solo na camada de 0 a 0,20 m de profundidade.

pH CaCl ₂	MO g dm ⁻³	P Resina mg dm ⁻³	K ----- mmol _c dm ⁻³	Ca	Mg	H+Al ----- mmol _c dm ⁻³	CTC	V %	Argila ----- g kg ⁻¹	Areia -----
5,5	19	29	2	36	15	21	74	72	260	710

Foi utilizado o esquema fatorial 4x3x2, perfazendo 24 combinações, as quais foram distribuídas em delineamento experimental em blocos ao acaso, com três repetições, totalizando 72 unidades experimentais. Foram utilizadas quatro doses de N (0, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹), três tratamentos da ureia (ureia com inibidor de urease: [N-(N-butil) tiofosfórico triamida] – “NBPT”; ureia com inibidor de nitrificação: (3-4-dimetilpirazol-fosfato) – “DMPP” e; ureia convencional) e duas épocas de aplicação: a) dose total aplicada no sulco de semeadura e; b) 30 kg ha⁻¹ no sulco de

semeadura e o restante em cobertura no momento em que as plantas estavam com quatro folhas completamente desenroladas (estádio fenológico V4 da escala de Ritchie, Hanway e Benson, 1993).

Todos os tratamentos receberam adubação básica de semeadura com 50 kg ha⁻¹ de K₂O e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, nas formas de cloreto de potássio e superfosfato simples, respectivamente, no sulco de semeadura. Em cobertura, juntamente com o N foram aplicados 40 kg ha⁻¹ de K₂O; nas parcelas que não receberam N foi feita a cobertura somente com o fertilizante potássico.

As sementes de milho foram distribuídas visando obter, aproximadamente, 65.000 plantas por hectare. Devido à utilização de excesso de sementes, 15 dias após a emergência das plântulas foi realizado desbaste para obter a população de plantas mencionada. A cultivar de milho utilizada foi o híbrido simples Dow 2B710.

As parcelas foram compostas por seis linhas de cinco metros de comprimento espaçadas de 0,9 m entre si, com área total de 27,0 m². Das quatro linhas centrais úteis, uma linha foi utilizada para as coletas de material vegetal utilizado nas avaliações, deixando-se para determinação da produtividade de grãos as outras três linhas (13,5 m²). As unidades experimentais foram separadas por carregadores de 1,0 m de comprimento.

3.2 Dados de precipitação e temperatura média do ar

Os dados diários de precipitação e temperatura média do ar durante o período experimental são apresentados na Figura 1. Os dados foram obtidos na Estação Agroclimatológica da UNESP/FCAV, Departamento de Ciências Exatas.

Durante o ciclo da cultura do milho ocorreu precipitação de 624,9 e 863,9 mm no primeiro e no segundo ano agrícola, respectivamente. A temperatura média do ar foi de, aproximadamente, 24,3°C durante os dois anos em que se realizou o trabalho.

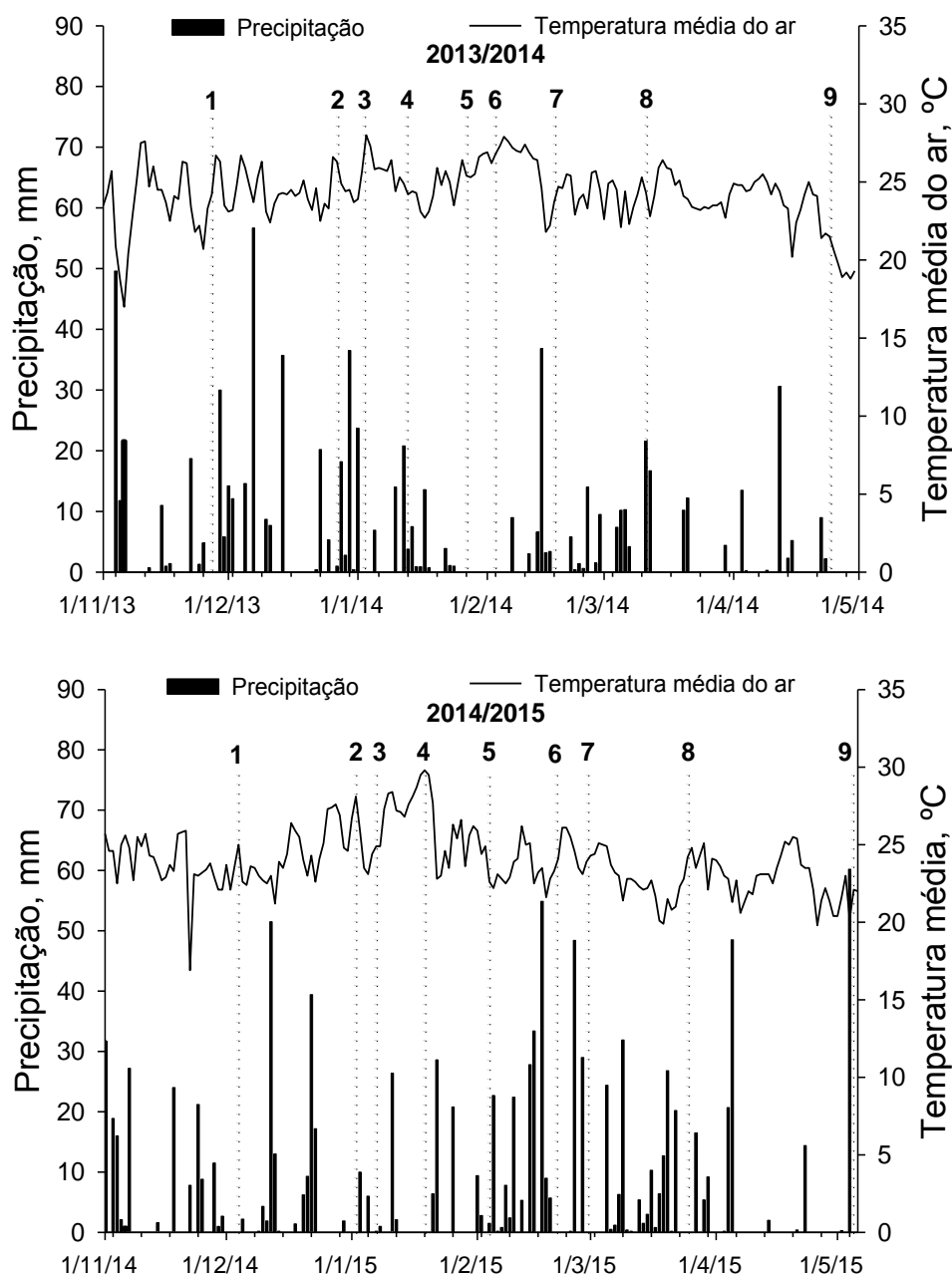


Figura 1. Dados diários de precipitação e temperatura média do ar no período experimental – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015. 1. Adubação nitrogenada e semeadura do milho; 2. Aplicação do N em cobertura; 3, 4 e 5. Análise foliar e avaliação do índice de clorofila (estádios fenológicos V6, V10 e R1, respectivamente); 6. Avaliação da área foliar; 7. Avaliações das características morfológicas das plantas; 8. Coleta de plantas inteiras para avaliações de acúmulos de massa seca e N na parte aérea; 9. Colheita e coleta de espigas para avaliações de produtividade de grãos e componentes da produção, respectivamente.

3.3 Avaliações

Durante o período experimental foram realizadas leituras para avaliar o índice de clorofila na folha com o clorofilômetro digital CFL 1030 (Falker, Porto Alegre, RS). As determinações foram realizadas nos estádios de seis (V6) e de 10 folhas (V10) completamente desenroladas e no pendoamento (inflorescência feminina – R1), utilizando-se dez plantas por parcela. Nos estádios vegetativos mencionados, as leituras foram realizadas na parte central da primeira folha recém-madura. Quando do aparecimento da inflorescência feminina (estádio fenológico R1), as leituras foram realizadas no terço médio da folha da inserção da espiga principal. As mesmas folhas utilizadas para a leitura com clorofilômetro foram amostradas e preparadas em laboratório para análise de N, segundo método descrito por Bataglia et al. (1983).

No estágio fenológico R2, foi realizada a avaliação da área foliar de três plantas de cada parcela utilizando-se o equipamento LI-3000C *Portable Leaf Area Meter* (LI-COR *Environmental* – Lincoln, Nebraska USA). Para isso, foram consideradas apenas as folhas fotossinteticamente ativas e não danificadas, ou seja, aquelas com 50% ou mais de área verde e/ou de sua forma original. Posteriormente, calculou-se o índice de área foliar (IAF), que é a relação da área foliar da planta pela área explorada pela planta, obtido pela equação:

$$\text{IAF} = \frac{\text{área foliar média (m}^2\text{)} \times \text{stand (plantas ha}^{-1}\text{)}}{10.000 \text{ (m}^2\text{)}}$$

No estágio fenológico R3, em 10 plantas por parcela, foram avaliadas as seguintes características morfológicas da planta de milho: altura da planta, altura de inserção da 1ª espiga e diâmetro do colmo. As medições das alturas da planta e de inserção da 1ª espiga foram realizadas utilizando-se régua graduada, medindo-se a distância do colo da planta até o início da inserção da folha bandeira e da primeira espiga, respectivamente. Para a medição do diâmetro do colmo (no meio do segundo entrenó acima das raízes adventícias) foi utilizado paquímetro digital.

No estágio fenológico R6 (maturação fisiológica dos grãos – aparecimento da camada preta), foram cortadas rente ao solo três plantas e levadas ao laboratório para determinação da concentração de N e dos acúmulos de massa seca e N na parte aérea. O material vegetal foi preparado e analisado para N conforme descrito por Bataglia et al. (1983).

Após a colheita, foram avaliados os seguintes componentes da produção: comprimento da espiga, diâmetro da espiga sem palha, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga, massa da espiga sem palha e massa de grãos por espiga, mediante uso de cinco espigas representativas de cada parcela. As medições do comprimento e diâmetro da espiga foram feitas utilizando-se régua graduada e paquímetro digital, respectivamente. Para a determinação das massas da espiga e de grãos por espiga foi utilizada balança analítica com precisão de 0,01g.

A produtividade de grãos foi estimada por meio da colheita manual das espigas e debulha mecanizada dos grãos da área útil de cada parcela. Visando ajustar a produtividade de grãos a 13% de umidade, subamostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65-70°C para a determinação da umidade. Também, foi coletada de cada parcela uma amostra de grãos para a determinação da massa de 1.000 grãos (umidade corrigida a 13%). Para a determinação da massa de 1.000 grãos foi realizada por parcela contagem manual e, em seguida, utilizada balança analítica com precisão de 0,01g. Foram determinadas, também, as concentrações de N nos grãos, segundo método descrito por Bataglia et al. (1983).

A eficiência agrônômica das doses de N foi calculada conforme descrito por Fageria e Baligar (2005). Para isso, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$EA = \frac{PG_{cf} - PG_{sf}}{QN_a}$$

Em que: EA é a eficiência agrônômica, expressa em kg kg⁻¹; PG_{cf} é a produção de grãos com fertilizante nitrogenado; PG_{sf} é a produção de grãos sem fertilizante nitrogenado e; QN_a é a quantidade de N aplicado, em kg.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o pacote estatístico AgroEstat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015). Os dados foram submetidos

à análise de variância pelo teste F e, quando constatadas diferenças significativas (5 ou 1% de probabilidade), realizaram-se estudos de regressão polinomial para as doses de N, testando-se os modelos linear e quadrático. O índice de clorofila na folha, a concentração de N na folha, o índice de área foliar e a produtividade de grãos foram relacionados com a produção relativa (%) e, em seguida, encontrados os níveis críticos, os quais foram associados a 90% da produção relativa de grãos de milho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias dos índices de clorofila e as concentrações de N nas folhas de milho nos estádios fenológicos V6, V10 e R1 em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação nos anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015 podem ser verificadas, respectivamente, nas Tabelas 2 e 3.

Os índices de clorofila e as concentrações de N nas folhas de milho nos estádios fenológicos V6, V10 e R1 nos anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015 em função de doses de N estão nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Esses valores foram relacionados com a produção relativa de grãos, sendo o nível crítico associado à produção relativa de 90% (Figura 4). Não houve efeito significativo do parcelamento da adubação nitrogenada, dos aditivos da ureia e da interação das doses de N com os tratamentos da ureia e com as épocas de aplicação nessas avaliações.

Nos três estádios fenológicos avaliados, observou-se que o incremento das doses de N aumentou o índice de clorofila (Figuras 2A e 2B) e a concentração de N nas folhas (Figuras 3A e 3B) nos dois anos agrícolas. Como o N faz parte da molécula de clorofila, o aumento de N foliar se reflete diretamente na leitura do ICF (Índice de Clorofila Falker) (ARGENTA et al., 2001). A concentração de N na folha é uma medida que pode ser utilizada como indicador do nível desse nutriente na planta, devido ao fato das folhas serem os órgãos da planta que melhor refletem o seu estado nutricional, respondendo mais rapidamente às variações no suprimento de nutrientes do solo e dos fertilizantes (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Gomes et al. (2007), Melo, Corá e Cardoso (2011) e Souza et al. (2011) também observaram aumento na concentração de N nas folhas com o incremento da dose desse nutriente.

Tabela 2. Índice de clorofila na folha em diferentes estádios fenológicos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Causas da Variação	V6		V10		R1	
	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015
Doses de N (D) (kg ha ⁻¹)	----- ¹ ICF-----					
0	42,46	36,30	41,72	41,34	41,50	44,49
50	52,85	45,39	49,41	44,22	46,65	47,54
100	55,21	45,22	53,03	45,99	52,62	51,36
200	57,91	45,48	60,04	46,84	59,79	53,10
Teste F	209,39**	184,57**	67,09**	102,70**	120,05**	117,48**
Regressão	Q	Q	L	Q	L	L
Tratamentos da ureia (T)						
Ureia + DMPP	52,43	43,73	52,46	44,42	50,24	49,26
Ureia + NBPT	51,69	42,65	50,92	44,60	50,13	49,09
Ureia convencional	52,20	42,92	49,77	44,78	50,05	49,02
Teste F	0,88 ^{NS}	1,80 ^{NS}	2,79 ^{NS}	0,74 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,15 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)						
Dose total na semeadura	52,99	43,08	50,45	44,61	49,91	48,89
Dose parcelada	51,22	43,11	51,65	44,58	50,37	49,35
Teste F	1,44 ^{NS}	0,01 ^{NS}	1,66 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,41 ^{NS}	1,67 ^{NS}
Interação	----- Teste F -----					
D x T	0,33 ^{NS}	1,87 ^{NS}	2,20 ^{NS}	1,21 ^{NS}	0,37 ^{NS}	0,86 ^{NS}
D x E	0,42 ^{NS}	1,54 ^{NS}	1,56 ^{NS}	2,02 ^{NS}	0,14 ^{NS}	1,18 ^{NS}
T x E	1,07 ^{NS}	1,47 ^{NS}	1,43 ^{NS}	0,22 ^{NS}	1,31 ^{NS}	0,44 ^{NS}
C.V. (%)	3,80	3,29	7,74	2,28	6,08	3,08

¹Índice de Clorofila Falker; ^{NS}: não significativo; **: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; (L): ajuste linear; (Q): ajuste quadrático; C.V.: Coeficiente de Variação.

Tabela 3. Concentração de N na folha em diferentes estádios fenológicos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Causas da Variação	V6		V10		R1	
	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015
Doses de N (D) (kg ha ⁻¹)	----- g kg ⁻¹ -----					
0	22,48	26,34	17,87	24,91	16,38	22,16
50	25,92	30,48	18,31	26,84	20,17	23,93
100	27,79	32,16	20,24	27,97	23,82	26,84
200	31,42	32,91	25,18	28,42	28,16	28,31
Teste F	86,95**	43,63**	10,73**	10,79**	49,10**	58,85**
Regressão	L	Q	Q	L	L	L
Tratamentos da ureia (T)						
Ureia + DMPP	26,98	30,87	19,74	26,48	23,22	25,18
Ureia + NBPT	27,21	29,51	21,49	27,55	21,92	25,39
Ureia convencional	26,53	31,04	19,97	27,08	21,26	25,37
Teste F	0,98 ^{NS}	1,48 ^{NS}	1,15 ^{NS}	1,66 ^{NS}	2,55 ^{NS}	0,13 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)						
Dose total na semeadura	26,98	30,91	20,55	26,98	21,94	24,94
Dose parcelada	26,83	30,03	20,25	27,09	22,33	25,68
Teste F	0,14 ^{NS}	3,90 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,05 ^{NS}	0,29 ^{NS}	0,42 ^{NS}
Interação	----- Teste F -----					
D x T	0,38 ^{NS}	0,24 ^{NS}	0,82 ^{NS}	0,79 ^{NS}	1,00 ^{NS}	0,25 ^{NS}
D x E	0,29 ^{NS}	0,57 ^{NS}	0,49 ^{NS}	1,73 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,66 ^{NS}
T x E	0,10 ^{NS}	0,60 ^{NS}	0,34 ^{NS}	1,02 ^{NS}	0,27 ^{NS}	0,78 ^{NS}
C.V. (%)	6,31	6,19	21,26	7,49	13,78	6,07

^{NS}: não significativo; ^{**}: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; (L): ajuste linear; (Q): ajuste quadrático; C.V.: Coeficiente de Variação.

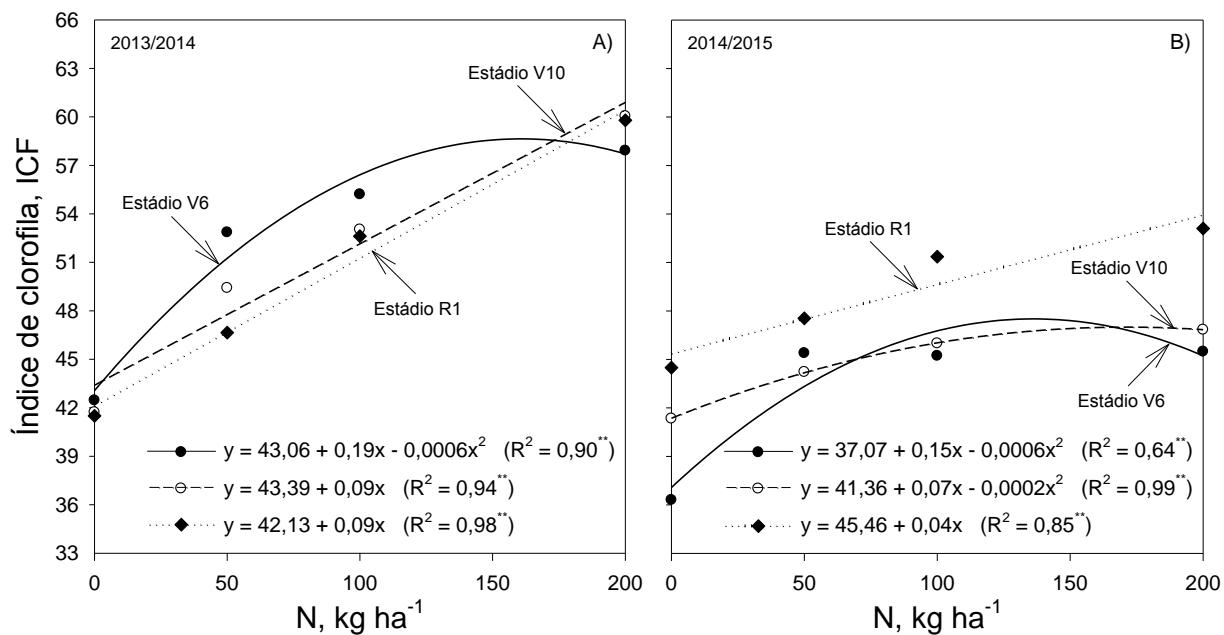


Figura 2. Índice de clorofila na folha em função de doses de N em diferentes estádios fenológicos da cultura do milho. A) Ano agrícola 2013/2014; B) Ano agrícola 2014/2015.

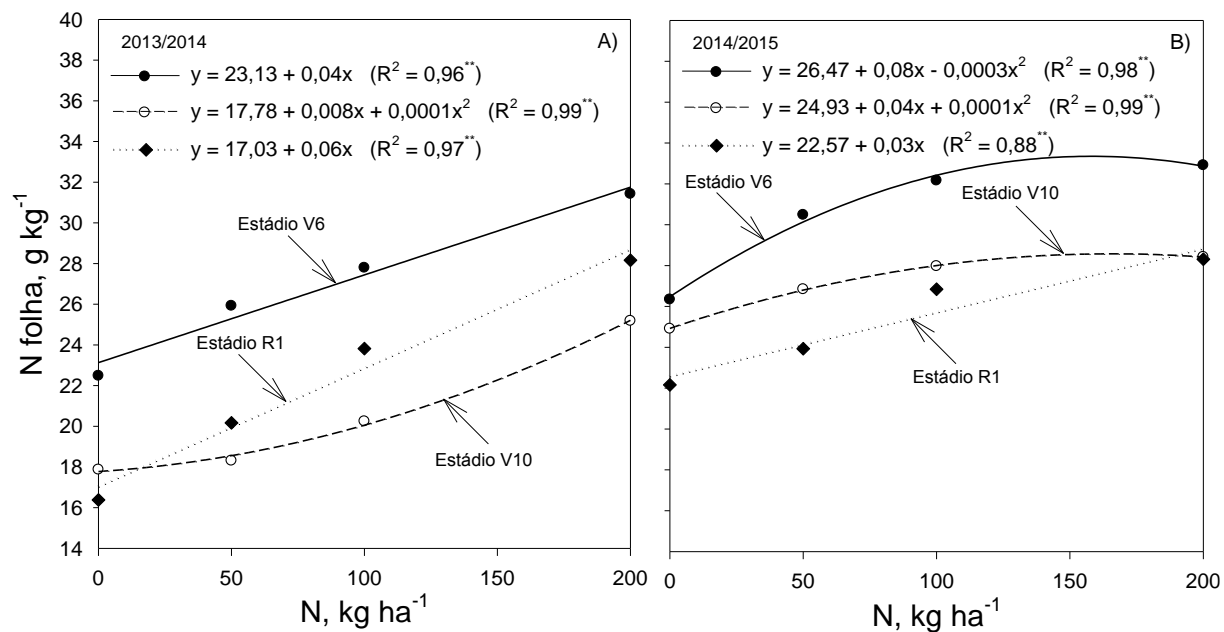


Figura 3. Concentração de N na folha em função de doses de N em diferentes estádios fenológicos da cultura do milho. A) Ano agrícola 2013/2014; B) Ano agrícola 2014/2015.

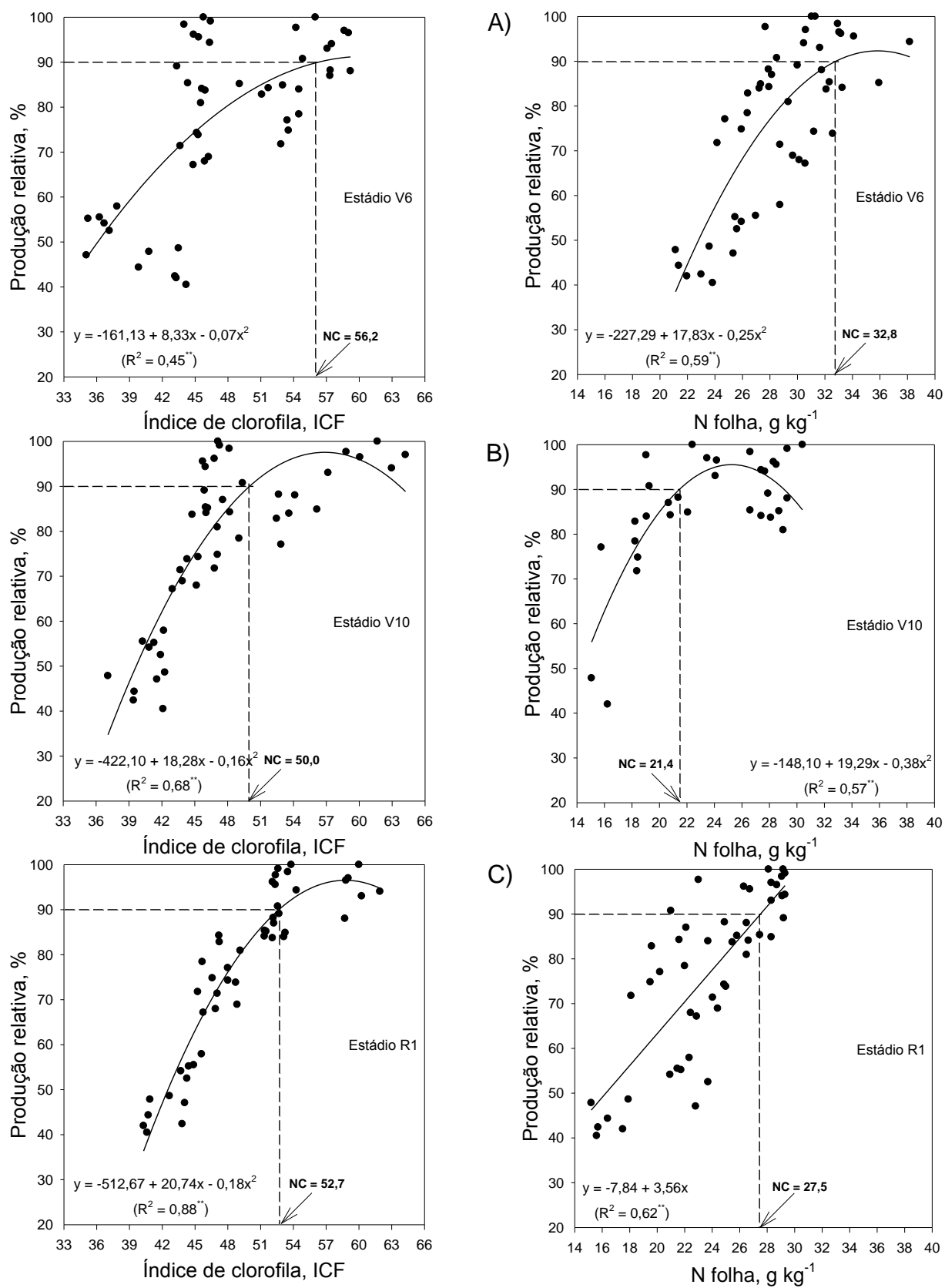


Figura 4. Produção relativa de grãos de milho em função do índice de clorofila e da concentração de N na folha – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015. A) Estádio V6; B) Estádio V10; C) Estádio R1.

Podendo estar relacionada com o rendimento de grãos, a determinação do índice de clorofila na folha pelo clorofilômetro tem sido sugerida para prever a necessidade de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho (PIEKIELEK; FOX, 1992; VARVEL; SCHEPERS; FRANCIS, 1997; ARGENTA et al., 2003). As leituras em diferentes estádios permitem uma alternativa em relação ao recomendado por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) e Argenta et al. (2001), que relatam que a folha que melhor representa o estado nutricional do milho é a primeira folha abaixo da espiga na fase do florescimento pleno da cultura. As avaliações das folhas nos estádios fenológicos V6 e V10 podem ser mais interessantes do que a folha diagnóstica no estágio fenológico R1, pois permitem, caso seja detectado baixo teor tanto de clorofila quanto de N, alguma medida de correção como, por exemplo, adubação adicional de cobertura com fertilizante nitrogenado (VARVEL; SCHEPERS; FRANCIS, 1997; BINDER; SANDER; WALTERS, 2000).

Nos estádios que antecedem o florescimento da cultura ocorre o desenvolvimento do sistema radicular, sendo possível, ainda, boa resposta à adubação nitrogenada. Já no estágio fenológico R1, a cultura apresenta baixa resposta à intervenção da aplicação de N, pois nesse momento está sendo determinado o número de óvulos que serão fertilizados e aqueles óvulos que não são fertilizados não produzirão grãos e, eventualmente, degenerarão (FORNASIERI FILHO, 2007). Outra desvantagem de se fazer diagnose foliar no estágio fenológico R1 é o tempo despendido entre a coleta e o resultado laboratorial, fazendo com que não tenha boa possibilidade de correção da deficiência de N no mesmo ano agrícola (ARGENTA et al., 2002). Assim, o monitoramento precoce pode minimizar o problema de subestimar ou superestimar a demanda nitrogenada no milho; esse monitoramento em estádios de desenvolvimento vegetativo se enquadra na agricultura de precisão (ARGENTA et al., 2001; OKUMURA et al. 2013b), em que as leituras com clorofilômetro podem ser realizadas em poucos minutos, sem danificar a folha, e o aparelho tem custo mínimo de manutenção (PIEKIELEK; FOX, 1992).

Para a obtenção de 90% da produção relativa de grãos, no estágio fenológico V6 foram observados níveis críticos de 56,2 de ICF e 32,8 g kg⁻¹ para concentração de N na folha (Figura 4A), no estágio fenológico V10 50,0 de ICF e 21,4 g kg⁻¹ de N (Figura 4B) e no estágio fenológico R1 52,7 de ICF e 27,5 g kg⁻¹ de N (Figura 4C).

Na literatura, ainda há carência de informações sobre teores adequados de clorofila e N em folhas de estádios anteriores a R1. No estágio fenológico V6, Piekielek e Fox (1992), Jemison e Lytle (1996) e Argenta et al. (2001) encontraram níveis críticos de 43,4; 42,0 e 52,1 de índice de clorofila, respectivamente. No estágio fenológico V10, na literatura os níveis críticos de índice de clorofila variaram de 48,6 (SUNDERMAN; PONTUS; LAWLESS, 1997) a 55,3 (ARGENTA et al., 2001). No estágio fenológico R1, Sunderman, Pontus e Lawless (1997) e Argenta et al. (2001) encontraram níveis críticos de 57,9 e 58,0 de índice de clorofila, respectivamente. Diferenças nos níveis críticos de índice de clorofila obtidos por diferentes autores no mesmo estágio fenológico da cultura devem-se ao tipo de folha amostrada e à aplicação prévia ou não de N antes da avaliação; também podem variar em função das produtividades de grãos encontradas nos experimentos, sendo recomendada a realização dos mesmos em diferentes ambientes e manejos (ARGENTA et al., 2001).

Em relação à concentração de N na folha diagnóstica do milho (estádio R1), Cantarella, Raij e Camargo (1996) consideram adequadas as concentrações de 27 a 35 g kg⁻¹, estando o nível crítico, observado no presente trabalho (27,5 g kg⁻¹) para se alcançar 90% da produção relativa de grãos, de acordo com esses autores. Em experimento realizado por Veloso et al. (2009) foram encontradas concentrações de N entre 26,5 e 33,8 g kg⁻¹.

As médias do índice de área foliar em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação nos anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015 podem ser verificadas na Tabela 4. Dos diferentes fatores avaliados, foi observado efeito significativo apenas das doses de N. Não houve interação significativa das doses de N com os tratamentos da ureia e com as épocas de aplicação nessa avaliação.

Tabela 4. Índice de área foliar no estágio fenológico R2 em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Causas da Variação	2013/2014	2014/2015
Doses de N (D) (kg ha ⁻¹)		
0	2,19	2,28
50	3,50	3,49
100	3,96	3,86
200	4,52	4,56
Teste F	389,82**	180,34**
Regressão	Q	Q
Tratamentos da ureia (T)		
Ureia + DMPP	3,78	3,31
Ureia + NBPT	3,63	3,69
Ureia convencional	3,62	3,64
Teste F	1,05 ^{NS}	1,14 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)		
Dose total na semeadura	3,47	3,49
Dose parcelada	3,61	3,60
Teste F	2,52 ^{NS}	2,41 ^{NS}
Interação	----- Teste F -----	
D x T	1,52 ^{NS}	1,93 ^{NS}
D x E	1,07 ^{NS}	1,76 ^{NS}
T x E	1,76 ^{NS}	1,67 ^{NS}
C.V. (%)	6,06	8,51

^{NS}: não significativo; **: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; (Q): ajuste quadrático; C.V.: Coeficiente de Variação.

Observa-se na Figura 5A que, para os dois anos agrícolas, o IAF aumentou significativamente com o incremento das doses de N. Para obter 90% da produção relativa de grãos, o IAF foi de, aproximadamente, 4,3 (Figura 5B). Nas parcelas que não receberam N, o IAF em relação aos demais tratamentos foi significativamente menor, devido ao fato do N ter grande influência na produção de células e, conseqüentemente, na taxa de alongamento foliar (VOLENEC; NELSON, 1984; SKINNER; NELSON, 1992). O N pode ter favorecido o crescimento da planta em decorrência do incremento da área foliar e, com isso, ter promovido maior síntese de fotoassimilados, ocorrendo translocação desses fotoassimilados sintetizados nas folhas para o enchimento dos grãos (DUETE et al., 2008).

Quando não há bom suprimento de N no solo no início e durante o estágio de crescimento das plantas de milho, o tamanho final das folhas é menor, reduzindo o

IAF e, conseqüentemente, a produtividade de grãos (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993), conforme observado no presente trabalho. Veloso et al. (2009) também observaram incremento no IAF com o aumento das doses de N. Esses autores, utilizando doses de até 200 kg ha⁻¹ de N, verificaram valores de IAF entre 2,47 e 3,43. O rendimento de grãos de milho aumenta significativamente com o incremento do IAF, devendo variar de 4 a 6, segundo resultados obtidos no *Corn Belt* americano (FANCELLI, 2010). Assim, o nível crítico de 4,3 de IAF encontrado no presente trabalho está dentro dessa faixa.

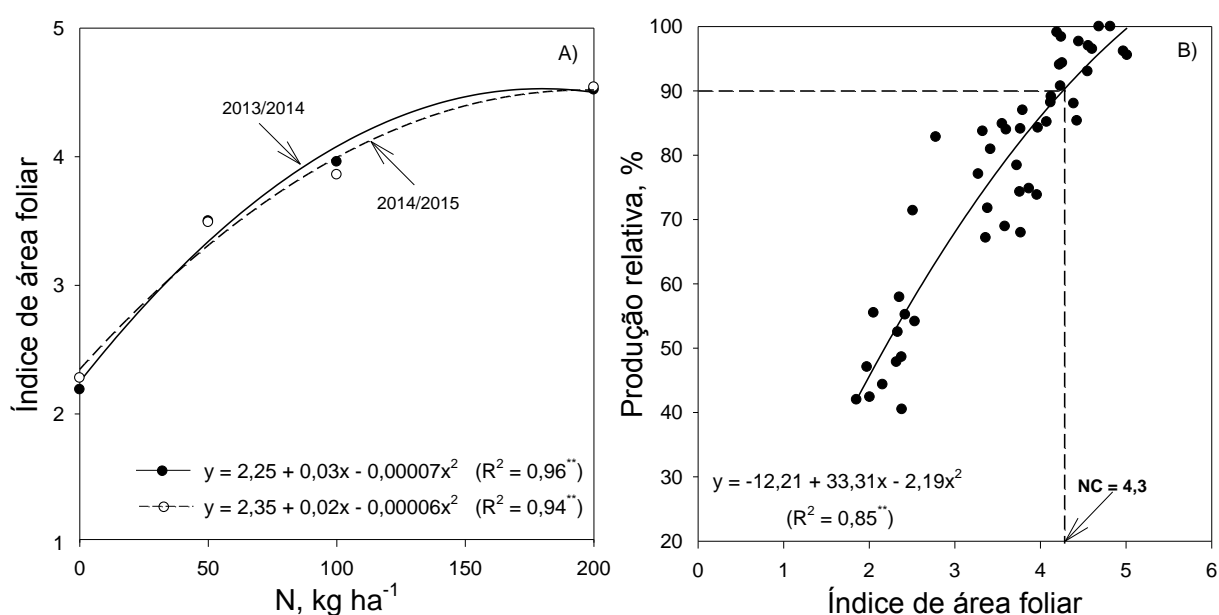


Figura 5. A) Índice de área foliar em função de doses de N; B) Produção relativa de grãos de milho em função do índice de área foliar – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Verifica-se na Tabela 5 que a adição de N aumentou significativamente as concentrações de N na parte aérea e nos grãos de milho. As médias da massa seca total e acúmulos de N na parte aérea e nos grãos nos anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015 podem ser verificadas na Tabela 6. Não houve efeito significativo do parcelamento da adubação nitrogenada, dos aditivos da ureia e da interação das doses de N com os tratamentos da ureia e com as épocas de aplicação nessas avaliações.

As concentrações de N nos grãos foram menores do que as encontradas por Coelho et al. (1992) e Villas Bôas et al. (1999), na faixa de 16,0 a 17,5 g kg⁻¹. Essa característica é altamente influenciada pelo genótipo (MEIRA et al., 2009).

Tabela 5. Concentração de N na parte aérea no estágio fenológico R6 e nos grãos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Causas da Variação	Parte aérea		Grãos	
	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015
Doses de N (D) (kg ha ⁻¹)	----- g kg ⁻¹ -----			
0	7,27	8,40	11,88	11,84
50	6,37	8,76	11,46	11,73
100	6,60	10,27	11,71	13,75
200	8,62	14,06	13,57	14,45
Teste F	17,98 ^{**}	48,34 ^{**}	20,92 ^{**}	21,06 ^{**}
Regressão	Q	Q	Q	L
Tratamentos da ureia (T)				
Ureia + DMPP	7,39	10,54	12,36	12,99
Ureia + NBPT	7,12	10,71	12,22	12,88
Ureia convencional	7,13	9,86	11,89	12,95
Teste F	0,54 ^{NS}	1,93 ^{NS}	1,73 ^{NS}	0,05 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)				
Dose total na semeadura	7,08	10,09	12,38	12,98
Dose parcelada	7,35	10,66	11,93	12,90
Teste F	1,28 ^{NS}	2,34 ^{NS}	0,46 ^{NS}	0,07 ^{NS}
Interação (Teste F)	----- Teste F -----			
D x T	0,93 ^{NS}	0,58 ^{NS}	0,24 ^{NS}	0,46 ^{NS}
D x E	1,23 ^{NS}	2,51 ^{NS}	1,31 ^{NS}	0,97 ^{NS}
T x E	1,08 ^{NS}	2,43 ^{NS}	0,74 ^{NS}	0,12 ^{NS}
C.V. (%)	14,02	15,22	7,33	9,77

^{NS}: não significativo; ^{**}: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; (L): ajuste linear; (Q): ajuste quadrático; C.V.: Coeficiente de Variação.

Tabela 6. Massa seca total e acúmulos de N na parte aérea e nos grãos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Causas da Variação	MS Parte aérea		N acumulado (Parte aérea)		N acumulado (Grãos)	
	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015
Doses de N (D) (kg ha ⁻¹)	----- kg ha ⁻¹ -----					
0	13.293,70	8.820,21	97	75	38	56
50	18.189,47	12.051,08	117	107	64	73
100	18.474,14	13.483,20	121	137	74	103
200	20.642,31	15.788,54	178	221	92	124
Teste F	18,39**	24,74**	25,06**	57,50**	48,65**	99,56**
Regressão	L	L	L	L	L	L
Tratamentos da ureia (T)						
Ureia + DMPP	17.544,81	13.184,54	131	146	67	88
Ureia + NBPT	17.954,45	12.451,37	129	139	68	90
Ureia convencional	17.450,47	11.971,35	124	121	66	89
Teste F	0,18 ^{NS}	1,45 ^{NS}	0,34 ^{NS}	3,18 ^{NS}	0,19 ^{NS}	0,06 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)						
Dose total na semeadura	17.696,25	12.505,47	127	133	66	88
Dose parcelada	17.603,56	12.566,04	130	138	68	90
Teste F	0,02 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,38 ^{NS}	0,25 ^{NS}	0,74 ^{NS}
Interação	----- Teste F -----					
D x T	1,10 ^{NS}	0,61 ^{NS}	1,09 ^{NS}	0,93 ^{NS}	1,14 ^{NS}	0,16 ^{NS}
D x E	1,67 ^{NS}	1,49 ^{NS}	2,60 ^{NS}	1,44 ^{NS}	0,27 ^{NS}	0,20 ^{NS}
T x E	0,15 ^{NS}	0,27 ^{NS}	0,64 ^{NS}	2,34 ^{NS}	1,45 ^{NS}	0,64 ^{NS}
C.V. (%)	17,40	19,85	22,90	25,84	20,57	14,37

^{NS}: não significativo; **: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; (L): ajuste linear; C.V.: Coeficiente de Variação.

Em relação à concentração de N nos grãos, observou-se incremento significativo com as doses de N aplicadas, corroborando com Amaral Filho et al. (2005), destacando a importância desse nutriente na quantidade de aminoácidos e proteína nos grãos. Também, a adição de N aumentou a concentração desse nutriente na parte aérea do milho. Nos tratamentos que não receberam N na adubação, além de apresentarem folhas pequenas, as mesmas morriam prematuramente, contribuindo para menor taxa de fotossíntese, o que se refletiu numa menor produtividade de massa seca da parte aérea e grãos. De acordo com Mengel e Kirkby (2001), essa senescência precoce sob condições de carência de N provavelmente está relacionada com a influência do N na síntese e translocação da citocinina, a qual é reduzida quando a nutrição nitrogenada é inadequada.

Observa-se na Tabela 6 que os grãos representam o maior dreno de N na planta, representando entre 39 a 75% do N acumulado na parte aérea das plantas de milho. Resultados semelhantes foram observados por Gava et al. (2006) e Silva et al. (2006) que relataram que 70 a 73% do N da planta de milho está contido nos grãos e, dessa forma, é exportado, evidenciando que maiores produtividades exigem quantidades adequadas de N. No entanto, a quantidade de N a ser drenada para o grão tem relação direta com o estado nutricional das plantas e também depende do ciclo, do período de enchimento dos grãos e, principalmente, da cultivar (MEIRA et al., 2009).

Observa-se na Tabela 7 que, independente dos tratamentos da ureia e das épocas de aplicação, houve incremento significativo das doses de N nas características morfológicas da planta de milho (altura da planta, altura de inserção da 1ª espiga e diâmetro do colmo). De acordo com Santos et al. (2002), existe relação positiva entre as alturas da planta e de inserção da 1ª espiga. Esses mesmos autores também evidenciaram relação positiva destas duas características com a produtividade, indicando que quanto maior a altura da planta, maior a produtividade de grãos. Souza e Soratto (2006) também verificaram aumento da altura da planta do milho em resposta à adição de N. Por outro lado, maiores alturas da planta e de inserção da 1ª espiga podem favorecer o acamamento ou quebraimento da planta (CASAGRANDE; FORNASIERI FILHO, 2002), porém esses fatores não foram observados no presente trabalho, provavelmente pelo fato de o

híbrido utilizado (Dow 2B710) não ser suscetível a essas características indesejáveis.

Também, o diâmetro do colmo é importante para a produtividade de grãos, pois plantas com menor diâmetro do colmo podem apresentar menor capacidade de armazenamento de fotoassimilados, necessários para o enchimento de grãos (MAGALHÃES; JONES, 1990; DOURADO NETO et al., 2003), além de preocupações com a possibilidade de acamamento e quebra do colmo (THOMISON et al., 2011). Silva et al. (2012), trabalhando com diferentes fontes e doses de ureia no milho, também observaram efeito significativo das doses de N para a variável diâmetro de colmo. Isso se deve ao fato do N ser importante para o crescimento vegetativo, influenciando diretamente a divisão e a expansão celular e o processo fotossintético (SILVA et al., 2006; FORNASIERI FILHO, 2007; GOMES et al., 2007).

A participação do N na produção de fitormônios (giberelinas, auxinas e citocininas) promotores de crescimento e de desenvolvimento responsáveis pelos processos de divisão e expansão celular (MENGEL; KIRKBY, 2001) refletiu-se nas plantas dos tratamentos que não receberam N, as quais apresentaram menores alturas da planta e de inserção da 1ª espiga e diâmetro do colmo. Resultado semelhante foi verificado por Lana et al. (2014). Por outro lado, Farinelli e Lemos (2010) não observaram resposta da adubação nitrogenada nessas características morfológicas da planta de milho. O incremento no crescimento da planta proporcionado pela adição de N beneficia o aumento da produtividade de grãos, provavelmente devido ao incremento da área foliar e, conseqüentemente, maior síntese de fotoassimilados, considerando que o N é constituinte da molécula de clorofila, atuando nos processos de divisão e expansão celular (VARVEL; SCHEPERS; FRANCIS, 1997; OKUMURA et al., 2011). No presente trabalho, possivelmente a adubação nitrogenada favoreceu a translocação de N e fotoassimilados dos órgãos vegetativos, sobretudo das folhas, para os grãos, conforme verificado por Duete et al. (2008). Segundo esses autores, além de incrementar as alturas da planta e de inserção da 1ª espiga e o diâmetro do colmo, o N também pode favorecer o crescimento do sistema radicular, proporcionando à planta condições para maior absorção de água e nutrientes.

Tabela 7. Altura da planta (AP), altura de inserção da 1ª espiga (AE) e diâmetro do colmo (DC) – estágio fenológico R3 – em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Causas da Variação	AP		AE		DC	
	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015
Doses de N (D) (kg ha ⁻¹)	----- cm -----				----- mm -----	
0	158,49	164,24	77,36	87,89	18,83	18,86
50	200,66	182,85	105,71	103,56	21,66	21,13
100	207,99	184,75	110,17	103,45	22,13	22,06
200	209,73	185,80	110,48	103,01	23,06	22,03
Teste F	289,47**	87,43**	258,03**	73,05**	69,22**	48,21**
Regressão	Q	Q	Q	Q	Q	Q
Tratamentos da ureia (T)						
Ureia + DMPP	194,98	180,23	100,13	99,94	21,40	20,84
Ureia + NBPT	194,40	178,65	102,22	99,36	21,42	21,16
Ureia convencional	193,28	179,35	100,43	99,13	21,44	21,06
Teste F	0,50 ^{NS}	0,71 ^{NS}	1,74 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,76 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)						
Dose total na semeadura	193,96	178,67	100,32	99,23 a	21,41 a	20,78
Dose parcelada	194,48	180,15	101,53	99,73 a	21,43 a	21,26
Teste F	0,14 ^{NS}	1,84 ^{NS}	1,50 ^{NS}	0,31 ^{NS}	0,02 ^{NS}	5,11*
Interação	----- Teste F -----					
D x T	0,33 ^{NS}	1,71 ^{NS}	0,47 ^{NS}	0,89 ^{NS}	0,72 ^{NS}	0,68 ^{NS}
D x E	1,13 ^{NS}	1,58 ^{NS}	0,48 ^{NS}	0,44 ^{NS}	0,32 ^{NS}	1,08 ^{NS}
T x E	1,08 ^{NS}	1,24 ^{NS}	0,01 ^{NS}	1,10 ^{NS}	1,23 ^{NS}	0,99 ^{NS}
C.V. (%)	3,10	2,58	4,15	3,86	4,34	4,37

^{NS}: não significativo; ***: significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; (Q): ajuste quadrático; C.V.: Coeficiente de Variação.

As médias dos componentes da produção (comprimento da espiga, diâmetro da espiga sem palha, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga, massa da espiga sem palha e massa de grãos por espiga) nos anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015 podem ser verificadas nas Tabelas 8 e 9, respectivamente. Não houve efeito significativo do parcelamento da adubação nitrogenada, dos aditivos da ureia e da interação das doses de N com os tratamentos da ureia e com as épocas de aplicação nessas avaliações. Nota-se que a adição de N proporcionou incremento em todos esses componentes da produção avaliados nos dois anos do experimento.

O comprimento da espiga é um dos mais importantes componentes da produção estando diretamente relacionado com a produtividade de grãos de milho, pois quanto maior for o comprimento da espiga, também maior será o número potencial de grãos a serem formados por fileira, característica pouco influenciada pelas práticas culturais, sendo mais afetada pelo genótipo. Com relação ao diâmetro da espiga, esta característica está relacionada com o enchimento de grãos e o número de fileiras de grãos por espiga, que também é influenciado pela genética da planta (GOES et al., 2012). Lourente et al. (2007) também observaram efeito significativo do N para as variáveis comprimento e diâmetro da espiga, constatando que o máximo diâmetro e comprimento foram de 46,54 mm e 18,12 cm, respectivamente, na dose de 200 kg ha⁻¹ de N, semelhantes aos verificados no presente trabalho. Assim, o comprimento e o diâmetro da espiga são características que determinam o potencial de produtividade desta cultura (OHLAND et al., 2005).

Alguns fatores associados à produção potencial da cultura do milho, como o número de fileiras de grãos por espiga, são definidos nos estádios fenológicos V7 a V8, necessitando nessa época de suprimento adequado de N (FORNASIERI FILHO, 2007). O número de grãos por fileira é afetado pelo tamanho da espiga, o qual é definido, principalmente, no período em que as plantas apresentam doze folhas completamente desenroladas (V12). Devido a isso, a produtividade de grãos também depende do número de fileiras de grãos por espiga (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). Assim, a carência de N durante o desenvolvimento do milho pode reduzir a produção final não somente como consequência de menor área foliar, mas

também como resultado de menor número de grãos ou fileiras por espiga (SILVA et al., 2005b).

No presente trabalho, o número de fileiras por espiga (2^o ano), número de grãos por fileira, número de grãos por espiga, massa da espiga e massa de grãos por espiga aumentaram com o incremento das doses de N. Ferreira et al. (2001), Souza e Soratto (2006), Kappes et al. (2011), Melo, Corá e Cardoso (2011) e Lana et al. (2014) também observaram incremento do N nessas características.

Nas plantas que não receberam N na adubação, os valores das variáveis dos componentes da produção foram menores em comparação às plantas que receberam esse nutriente, possivelmente estando associado ao baixo suprimento de fotoassimilados e água às espigas, levando ao aborto de óvulos recentemente fertilizados no início do enchimento de grãos ou reduzindo o número de óvulos nos primórdios da espiga aptos para a fertilização (ERNANI et al., 2005; ROSSINI; MADDONNI; OTEGUI, 2012). Assim, nas parcelas que não receberam esse nutriente na adubação, a carência de N durante o desenvolvimento do milho provavelmente reduziu a produção final de grãos não somente como consequência de menor área foliar, mas também como resultado de menor número de grãos e fileiras por espiga, conforme também verificado por Silva et al. (2005b), podendo considerar que o número de grãos por espiga se relaciona mais intensamente com a produtividade de grãos de milho do que qualquer outro componente da produção (BELOW, 2002), destacando a importância do suprimento adequado de N para a cultura do milho.

Tabela 8. Comprimento da espiga (CE), diâmetro da espiga sem palha (DESP), número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), número de grãos por espiga (NGE), massa da espiga sem palha (MESP) e massa de grãos por espiga (MGE) em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – ano agrícola 2013/2014.

Causas da Variação	CE	DESP	NFE	NGF	NGE	MESP	MGE
Doses de N (D)							
(kg ha ⁻¹)	---- cm ----	---- mm ----				----- g -----	
0	10,64	42,91	17,80	24,20	430,93	113,37	96,38
50	12,16	44,29	18,22	28,41	516,47	139,66	118,58
100	13,01	44,70	17,98	30,09	541,32	151,03	128,35
200	13,33	45,89	17,93	30,19	540,71	165,20	140,37
Teste F	55,82**	19,28**	0,81 ^{NS}	41,14**	31,21**	32,53**	32,13**
Regressão	Q	L	-	Q	Q	L	L
Tratamentos da ureia (T)							
Ureia + DMPP	12,49	44,79	18,00	28,64	515,42	146,46	124,38
Ureia + NBPT	12,33	44,50	18,10	28,43	514,54	143,44	122,11
Ureia convencional	12,03	44,05	17,85	27,59	492,11	137,04	116,27
Teste F	2,90 ^{NS}	2,37 ^{NS}	0,55 ^{NS}	2,15 ^{NS}	2,66 ^{NS}	2,08 ^{NS}	2,22 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)							
Dose total na semeadura	12,34	44,52	18,16	28,36	514,61	143,09	121,54
Dose parcelada	12,23	44,37	17,81	28,09	500,10	141,54	120,30
Teste F	0,53 ^{NS}	0,28 ^{NS}	3,08 ^{NS}	0,37 ^{NS}	2,41 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,15 ^{NS}
Interação	----- Teste F -----						
D x T	0,84 ^{NS}	0,27 ^{NS}	1,11 ^{NS}	0,77 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,53 ^{NS}	0,46 ^{NS}
D x E	1,00 ^{NS}	0,62 ^{NS}	1,04 ^{NS}	1,23 ^{NS}	0,19 ^{NS}	1,04 ^{NS}	1,08 ^{NS}
T x E	0,11 ^{NS}	0,07 ^{NS}	1,16 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,47 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,01 ^{NS}
C.V. (%)	5,55	2,66	4,63	6,57	7,82	11,47	11,36

^{NS}: não significativo; **: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; (L): ajuste linear; (Q): ajuste quadrático; C.V.: Coeficiente de Variação.

Tabela 9. Comprimento da espiga (CE), diâmetro da espiga sem palha (DESP), número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), número de grãos por espiga (NGE), massa da espiga sem palha (MESP) e massa de grãos por espiga (MGE) em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – ano agrícola 2014/2015.

Causas da Variação	CE	DESP	NFE	NGF	NGE	MESP	MGE
Doses de N (D)							
(kg ha ⁻¹)	---- cm ----	---- mm ----				----- g -----	
0	11,72	44,87	15,84	23,69	376,13	103,86	89,97
50	13,23	46,53	16,22	26,97	438,89	128,18	111,01
100	14,62	48,06	16,36	29,71	486,63	152,16	133,58
200	15,97	49,28	16,44	32,87	540,03	176,10	153,76
Teste F	68,15**	45,00**	3,60*	54,91**	48,76**	71,65**	68,78**
Regressão	L	L	L	L	L	L	L
Tratamentos da ureia (T)							
Ureia + DMPP	13,96	47,36	16,38	28,56	469,51	141,48	122,80
Ureia + NBPT	14,12	47,57	16,20	28,65	465,78	146,42	127,69
Ureia convencional	13,58	46,62	16,07	27,72	445,97	142,33	125,76
Teste F	2,05 ^{NS}	1,40 ^{NS}	1,73 ^{NS}	1,26 ^{NS}	2,14 ^{NS}	1,51 ^{NS}	1,43 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)							
Dose total na semeadura	13,76	46,84	16,24	28,06	456,83	135,91	118,09
Dose parcelada	14,01	47,53	16,19	28,56	464,00	144,24	126,07
Teste F	1,33 ^{NS}	0,60 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,90 ^{NS}	0,52 ^{NS}	5,15*	5,74*
Interação	----- Teste F -----						
D x T	0,90 ^{NS}	0,40 ^{NS}	1,46 ^{NS}	0,93 ^{NS}	1,06 ^{NS}	0,50 ^{NS}	0,49 ^{NS}
D x E	0,71 ^{NS}	0,71 ^{NS}	0,84 ^{NS}	0,95 ^{NS}	0,88 ^{NS}	0,71 ^{NS}	0,68 ^{NS}
T x E	0,01 ^{NS}	0,35 ^{NS}	0,65 ^{NS}	0,05 ^{NS}	0,67 ^{NS}	0,86 ^{NS}	1,12 ^{NS}
C.V. (%)	6,74	2,56	3,65	7,91	9,20	11,12	11,58

^{NS}: não significativo; **, * : significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; (L): ajuste linear; C.V.: Coeficiente de Variação.

As médias da massa de 1.000 grãos e da produtividade de grãos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação nos anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015 podem ser verificadas na Tabela 10. Não houve efeito significativo do parcelamento da adubação nitrogenada, dos aditivos da ureia e da interação das doses de N com os tratamentos da ureia e com as épocas de aplicação nessas avaliações.

Tabela 10. Massa de 1.000 grãos e produtividade de grãos em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Causas da Variação	Massa de 1.000 grãos		Produtividade de grãos	
	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015
Doses de N (D) (kg ha ⁻¹)	----- g -----		----- Mg ha ⁻¹ -----	
0	256,16	274,52	3,63	5,43
50	253,05	293,33	6,42	7,13
100	259,58	309,24	7,28	8,56
200	273,88	325,57	7,78	9,83
Teste F	15,46**	61,66**	56,89**	154,36**
Regressão	Q	L	Q	L
Tratamentos da ureia (T)				
Ureia + DMPP	261,83	300,77	6,23	7,66
Ureia + NBPT	262,79	303,89	6,33	7,82
Ureia convencional	257,38	297,33	6,27	7,74
Teste F	2,03 ^{NS}	1,85 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,33 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)				
Dose total na semeadura	260,20	298,12	6,08	7,59
Dose parcelada	261,13	303,21	6,48	7,89
Teste F	0,16 ^{NS}	3,34 ^{NS}	2,64 ^{NS}	3,96 ^{NS}
Interação (Teste F)	-----		-----	
D x T	1,46 ^{NS}	0,25 ^{NS}	0,52 ^{NS}	0,02 ^{NS}
D x E	1,38 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,003 ^{NS}	0,24 ^{NS}
T x E	0,43 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,68 ^{NS}
C.V. (%)	3,81	3,92	16,58	8,35

^{NS}: não significativo; **: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; (L): ajuste linear; (Q): ajuste quadrático; C.V.: Coeficiente de Variação.

Em relação à massa de 1.000 grãos e produtividade de grãos, não houve efeito significativo dos tratamentos da ureia e das épocas de aplicação. Observa-se resposta significativa apenas das doses de N aplicadas, demonstrando a importância desse nutriente para a cultura do milho (Figuras 6 e 7, respectivamente). Em

comparação com as plantas que receberam N na adubação, as plantas das parcelas sem esse nutriente eram menores, as folhas eram pequenas, com senescência precoce e folhas mais velhas cloróticas, o que contribuiu para menor taxa de fotossíntese, menor ICF, menor concentração de N, menor IAF e, conseqüentemente, menor produtividade de grãos.

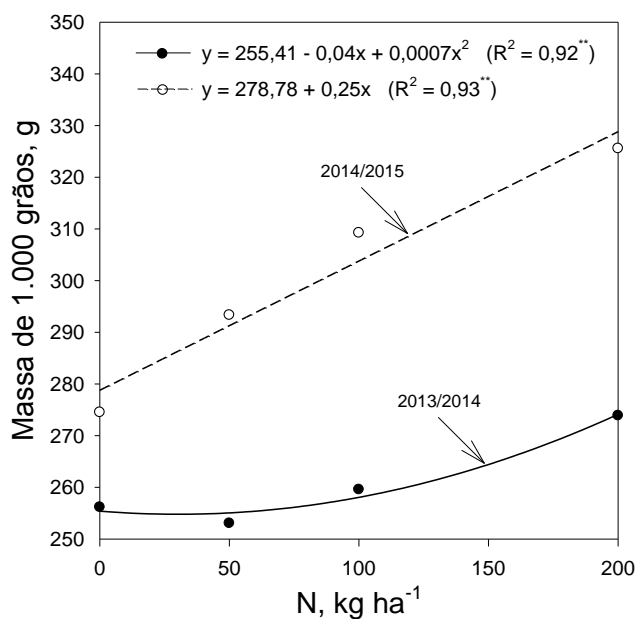


Figura 6. Massa de 1.000 grãos em função de doses de N.

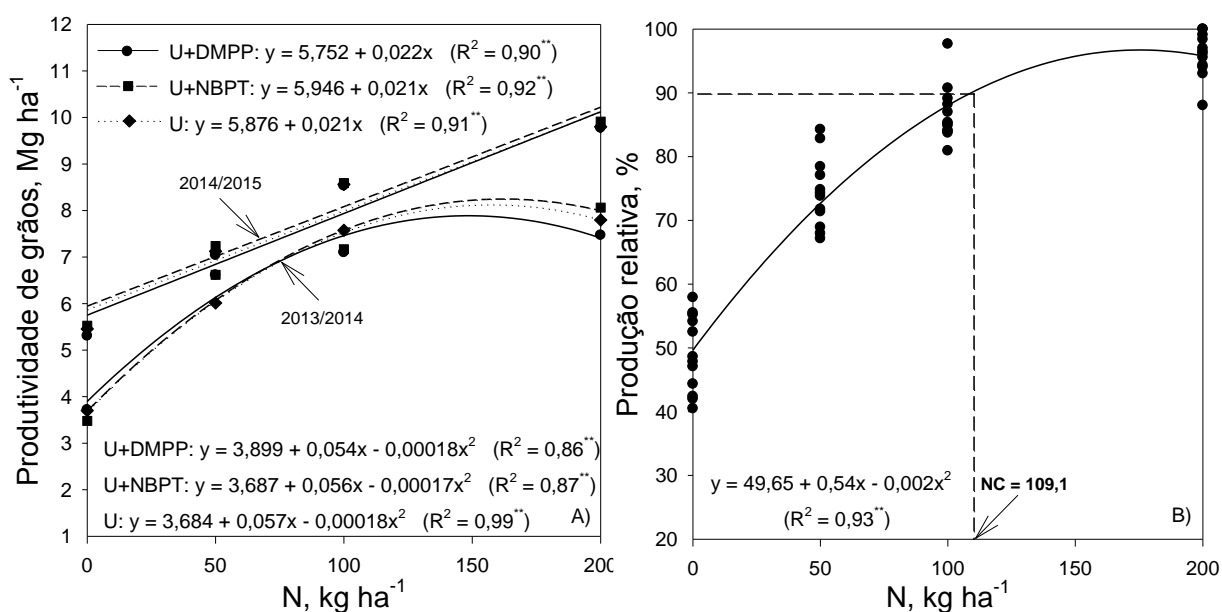


Figura 7. A) Produtividade de grãos de milho em função de doses de N e tratamentos da ureia; B) Produção relativa de grãos de milho em função de doses de N – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Observa-se na Figura 6 que, nos dois anos agrícolas, o aumento das doses de N incrementou a massa de 1.000 grãos. Isso ocorreu, provavelmente, porque o incremento das doses de N mantém as folhas fisiologicamente ativas por mais tempo, prolongando a duração do período de enchimento de grãos e favorecendo a produção de grãos mais pesados. Soratto et al. (2010) também observaram aumento na massa de 1.000 grãos com o incremento das doses de N. O enchimento e a massa dos grãos estão relacionados com o conteúdo de citocinina nas espiguetas, hormônio cuja síntese e translocação são influenciadas pelo N (ZHANG et al., 2010). Devido a isso, Silva et al. (2005b) observaram que a adição de N proporciona aumento na massa de 1.000 grãos. Assim, na ausência de adubação com N ou em doses inadequadas, a quantidade de citonina sintetizada pode diminuir a massa de 1.000 grãos e, conseqüentemente, a produtividade de grãos da cultura (Figura 7).

No primeiro ano houve aumento linear de produtividade de grãos em resposta à adição de N e no segundo ano a resposta foi quadrática. O incremento na produtividade de grãos com o uso do N pode ser atribuído ao fato do mesmo ser constituinte da molécula de clorofila e atuar nos processos de divisão e expansão celular (MENGEL; KIRKBY, 2001). Devido à desuniformidade das chuvas nos dois anos agrícolas e à menor precipitação no primeiro ano (Figura 1), observa-se que a produtividade de grãos no segundo ano foi superior à obtida no primeiro ano, independentemente dos tratamentos da ureia e das épocas de aplicação (Figura 7A).

Durante o ciclo da cultura do milho, ocorreu precipitação total de 624,9 e 863,9 mm no primeiro e no segundo ano agrícola, respectivamente (Figura 1). No primeiro ano, a precipitação total foi 33,5% menor em relação à média de 30 anos da região (939,2 mm), enquanto no segundo ano a diferença foi de 8,0%. A temperatura média do ar foi de, aproximadamente, 24,3°C durante os dois anos em que se realizou o experimento, semelhante à média histórica da região.

A cultura do milho para a produção de grãos demanda 380 a 550 mm de água em seu ciclo completo, dependendo das condições climáticas. O período de máxima exigência de água pelo milho é na fase do pendoamento, por isso déficits de água que ocorrem nesse período são os que provocam maiores reduções na produtividade de grãos. Déficit anterior ao pendoamento reduz a produtividade em

20 a 30%, no pendoamento em 40 a 50% e após em 10 a 20% (ALBUQUERQUE, 2010). Matzenauer, Westphalen e Bergamaschi (1983) também observaram demanda hídrica semelhante de, aproximadamente, 573 mm. Já Doorenbos e Kassam (1994) observaram necessidade de 500 a 800 mm de água, dependendo do clima, para a obtenção de máxima produção de grãos de milho. No presente trabalho, apesar de as precipitações totais ocorridas nos dois anos agrícolas estarem de acordo com a demanda do milho indicada por esses autores, as mesmas não foram distribuídas uniformemente ao longo do ciclo da cultura. Houve períodos de estiagem que antecederam e coincidiram com a entrada das plantas no estágio fenológico R1 (fase do pendoamento), o que pode ter afetado a produtividade de grãos e a eficiência dos tratamentos da ureia e das épocas de aplicação nas avaliações realizadas. O efeito do nitrogênio na produtividade de grãos de milho está ligado a diversos fatores do ambiente, como a quantidade de água disponível durante pontos críticos da cultura (MANSOURI-FAR; SANAVY; SABERALI, 2010).

As condições de umidade do solo podem influenciar as perdas de NH_3 por volatilização. No momento da adubação nitrogenada de cobertura, a umidade do solo estava baixa. Esta condição não é favorável às perdas acentuadas de N por volatilização de NH_3 devido à baixa atividade da enzima urease, que é altamente dependente da umidade do solo e, em solo seco, a ureia é pouco hidrolisada (CANTARELLA, 2007). No entanto, observa-se na Figura 1 que, no mesmo dia, logo após a adubação de cobertura, houve incidência de chuvas, o que pode ter incorporado a ureia na camada superficial do solo (18,2 mm – 1º ano e 10,0 mm – 2º ano), diminuindo a volatilização de NH_3 . Por outro lado, as precipitações ocorridas foram menores que a média histórica da região e, provavelmente, não foram suficientes para ocasionar a lixiviação de NO_3^- no perfil do solo. As perdas de NH_3 da ureia podem ser menores que 1% caso ocorra incidência de chuva imediatamente após a sua aplicação (KISSEL et al., 2004). Perdas de N por nitrificação e lixiviação ocorrem, especialmente, quando são utilizadas doses elevadas do nutriente e a cultura é conduzida em solos arenosos e sob condições de elevada precipitação (JAYNER; COLVIN, 2006). Assim, esses fatos podem ter contribuído para a ausência de diferença significativa entre a ureia com inibidores de urease (NBPT) e nitrificação (DMPP) e a ureia convencional.

No entanto, Cantarella et al. (2008) observaram reduções de 15 a 78% nas perdas de N por volatilização quando utilizada ureia tratada com NBPT. De acordo com Cantarella e Marcelino (2008), o NBPT pode inibir a degradação enzimática da ureia pela ação da urease por um período de 10 a 14 dias. Por outro lado, Okumura et al. (2013a) observaram respostas semelhantes na produtividade de grãos de milho quando utilizada ureia com NBPT e ureia convencional. Segundo Grant (2005), inibidores de urease têm maior benefício na redução de volatilização em situações em que é difícil a incorporação do fertilizante ou em solos com elevada atividade da urease por causa da falta de cultivo ou à acumulação de material orgânico. Zerulla et al. (2001) observaram que o DMPP adicionado à ureia pode inibir o processo de nitrificação por 4 a 10 semanas, devido à baixa mobilidade no solo desse aditivo, não estando sujeito à lixiviação. No entanto, em condições de campo, no Brasil, em alguns trabalhos com DMPP não têm apresentado incremento significativo na produtividade de grãos de milho em relação a uma fonte sem esse inibidor (MEIRA et al., 2009). A eficiência desse inibidor é maior em solos arenosos, pois tende a ser adsorvido à fração argila do solo (BARTH; von TUCHER; SCHMIDHALTER, 2001).

Também, mesmo o solo apresentando 710 g kg^{-1} de areia, foram indiferentes as épocas de aplicação da ureia (aplicação única na semeadura ou parcelada) em relação à produtividade de grãos de milho, conforme observado também por Pöttker e Wiethölter (2004) e Coutinho Neto et al. (2013). Possivelmente, também, a precipitação abaixo da média histórica da região pode ter contribuído para esse fato. Devido a isso, nas condições do presente trabalho pode ser oneroso o parcelamento da adubação nitrogenada e a utilização da ureia com os aditivos, considerando que a ureia convencional é a fonte nitrogenada com menor custo (CANTARELLA, 2007).

Para obtenção de 90% da produtividade esperada de grãos foi necessária dose de, aproximadamente, 110 kg ha^{-1} (Figura 7B). Fernandes et al. (2005) também observaram dose semelhante para obter máxima produtividade de grãos. Já Farinelli e Lemos (2010) observaram que, aplicando 92 kg ha^{-1} de N em cobertura, a máxima produtividade de grãos foi de $10,5 \text{ Mg ha}^{-1}$. Na literatura, diversos trabalhos têm destacado a importância do N para a cultura do milho em relação à produtividade de grãos, porém em doses variadas desse nutriente (SILVA et al., 2006; GOMES et al., 2007; DUETE et al., 2008; PAVINATO et al., 2008; MEIRA et al., 2009; OKUMURA

et al., 2011; LANA et al., 2014), uma vez que as mesmas variam de acordo com o sistema de cultivo, manejo da adubação, condições edafoclimáticas, híbrido utilizado, etc. A importância do suprimento de nitrogênio à planta é destacada por Mansouri-Far, Sanavy e Saberali (2010), bem como a realização de seu manejo eficiente, possibilitando reduzir custos e danos ao meio ambiente e obter produções rentáveis.

As médias da eficiência agrônômica em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação nos anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015 podem ser verificadas na Tabela 11. A eficiência agrônômica foi afetada significativamente apenas pelas doses de N. Não houve interação das doses de N com os tratamentos da ureia e com as épocas de aplicação nessa avaliação.

Tabela 11. Eficiência agrônômica em função de doses de N, tratamentos da ureia e épocas de aplicação – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Causas da Variação	2013/2014	2014/2015
Doses de N (D)		
(kg ha ⁻¹)	----- kg kg ⁻¹ -----	
50	58,42	34,09
100	36,48	31,33
200	20,71	22,00
Teste F	41,19**	6,96**
Regressão	L	L
Tratamentos da ureia (T)		
Ureia + DMPP	40,60	28,34
Ureia + NBPT	39,07	30,06
Ureia convencional	35,94	29,02
Teste F	0,65 ^{NS}	0,13 ^{NS}
Épocas de Aplicação (E)		
Dose total na semeadura	35,33	26,80
Dose parcelada	41,75	31,48
Teste F	3,55 ^{NS}	2,86 ^{NS}
Interação (Teste F)		
D x T	1,85 ^{NS}	0,05 ^{NS}
D x E	1,12 ^{NS}	1,09 ^{NS}
T x E	0,05 ^{NS}	0,21 ^{NS}
C.V. (%)	32,49	34,98

^{NS}: não significativo; **: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; (L): ajuste linear; C.V.: Coeficiente de Variação.

Observa-se na Figura 8 que a eficiência agrônômica desse nutriente diminuiu significativamente com o aumento das doses de N nos dois anos agrícolas, independentemente dos tratamentos da ureia e das épocas de aplicação. Na dose de 50 kg ha⁻¹ de N, a produção de grãos de milho foi de 58,42 e 34,09 kg kg⁻¹ (Tabela 11), no primeiro e no segundo ano, respectivamente. Isso reflete que nem sempre a quantidade recomendada para obter altas produtividades, que geralmente ultrapassa a dose de 120 kg ha⁻¹ de N em cobertura (COELHO, 2007), corresponde à mesma quantidade que propicia ganhos na eficiência agrônômica.

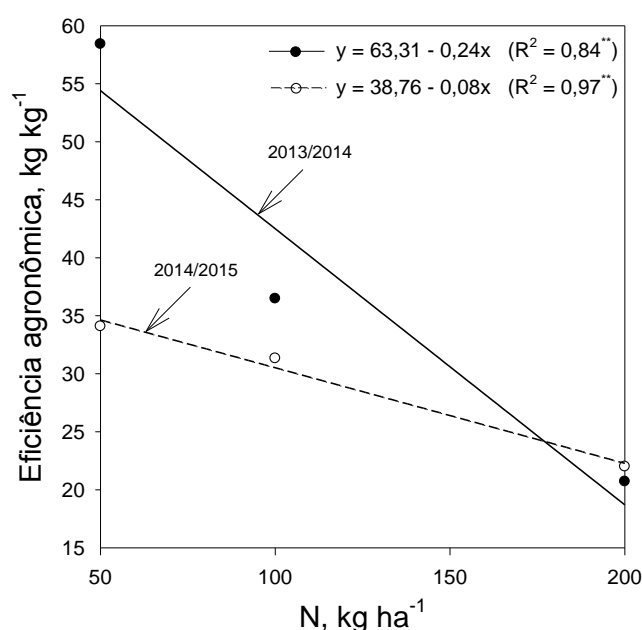


Figura 8. Eficiência agrônômica em função de doses de N – anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Esses resultados concordam com Fernandes et al. (2005) que, avaliando a eficiência de uso de N em cultivares de milho, utilizando doses de até 180 kg ha⁻¹ de N, observaram que o aproveitamento de N decresceu com a elevação das doses aplicadas em razão de o suprimento desse nutriente exceder as necessidades da cultura do milho. A eficiência agrônômica do N é variável com a dose empregada, sendo menor na presença das doses mais elevadas (BARBIERI et al., 2008). Sangoi et al. (2015), utilizando doses elevadas de N (até 420 kg ha⁻¹), também observaram decréscimo na eficiência agrônômica com o incremento das doses desse nutriente.

5 CONCLUSÃO

A ureia tratada com inibidores de urease (NBPT) e nitrificação (DMPP) não promoveu diferenças significativas no crescimento, no estado nutricional e, conseqüentemente, na produtividade de grãos de milho em relação à ureia convencional;

Avaliações do índice de clorofila com clorofilômetro digital (método não destrutível e de rápido diagnóstico) e concentração de N na folha em estádios iniciais podem possibilitar medidas de correção de deficiência com adubação adicional de N em cobertura caso sejam detectados baixos teores.

6 REFERÊNCIAS

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Matéria orgânica do solo, nitrogênio e enxofre nos diversos sistemas de exploração agrícola. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute (INPI Brasil), 2007. p. 1-42.

ALBUQUERQUE, P. E. P. **Cultivo do milho**: Irrigação. Embrapa Milho e Sorgo. (Sistema de Produção, 1). ISSN 1679-012X Versão Eletrônica – 6ª edição Set./2010.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Fixação simbiótica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 449-456, 2006.

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.

AMARAL FILHO, J. P. R.; FORNASIERI FILHO, D.; FARINELLI, R.; BARBOSA, J. C. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 467-473, 2005.

ARGENTA, G. **Monitoramento do nível de nitrogênio na planta como indicador da adubação nitrogenada em milho**. 2001. 112 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BORTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, p. 158-167, 2001.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; FOSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L.; SUHRE, E.; TEICHMANN, L. L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 109-119, 2003.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; MIELNICZUK, J.; BORTOLINI, C. G. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 519-527, 2002.

AZAM, F.; BENCKISER, G.; MULLER, C.; OTTOW, J. C. G. Release, movement and recovery of 3,4-dimethylpyrazole-phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 34, p. 118-125, 2001.

BARBIERI, P. A.; ECHEVERRIA, H. E.; ROZAS, H. R. S.; ANDRADE, F. H. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. **Agronomy Journal**, v. 100, p. 1094-1100, 2008.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agrônômica & AgroEstat**: Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda., 2015. 396 p.

BARTH, G.; von TUCHER, S.; SCHMIDHALTER, U. Influence of soil parameters on the effect of 3,4-dimethylpyrazole-phosphate as a nitrification inhibitor. **Biology and Fertility of Soils**, v. 34, p. 98-102, 2001.

BASSO, C. J.; CERETTA, C. A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura no solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, 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 em plantas**. Campinas: IAC, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BELOW, F. E. Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada do milho. **Informações Agronômicas**, n. 99, p. 7-12, 2002.

BERTOLINI, E. V.; GAMERO, C. A.; SALATA, A. C.; PIFFER, C. R. Antecipação da adubação de semeadura do milho em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2355-2366, 2008.

BINDER, D. L.; SANDER, D. H.; WALTERS, D. T. Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 1228-1236, 2000.

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., 2007, Gramado. **Resumos...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1 CD-ROM.

BYRNES, B. H.; FRENEY, J. R. Recent developments on the use of urease inhibitors in the tropics. **Fertilizer Research**, v. 42, p. 251-259, 1995.

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. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A. P.; ANDRADE, C. A. Manejo de nitrogênio e de matéria orgânica em milho no sistema plantio direto. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (Ed.). **Milho: Tecnologia & Produção**. Piracicaba: USP/ESALQ/DPV, 2005. p. 59-82.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. **Informações Agronômicas**, n. 122, p. 12-14, 2008.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; CAMARGO, C. E. O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. p. 75-71. (Boletim Técnico, 100).

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 volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 397-401, 2008.

CASAGRANDE, J. R. R.; FORNASIERI FILHO, D. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 33-40, 2002.

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

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, p. 352-358, 1992.

COELHO, A. M. **Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 11 p. (Circular Técnica, 96).

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E.; BAHIA FILHO, A. F. C.; GUEDES, G. A. A. Doses e métodos de aplicação de fertilizantes nitrogenados no cultivo do milho sob irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 61-67, 1992.

CONNELL, J. A.; HANCOCK, D. W.; DURHAM, R. G.; CABRERA, M. L.; HARRIS, G. H. Comparison of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers of reducing ammonia loss and improving bermudagrass forage production. **Crop Science**, v. 51, p. 2237-2248, 2011.

COUTINHO NETO, A. M.; COUTINHO, E. L. M.; ORIOLI JÚNIOR, V.; CORÁ, J. E.; SILVA, A. R. B.; SCATOLIN, M. Nitrogen fertilization management in no-tillage maize with different winter crops. **Bioscience Journal**, v. 29, p. 1981-1988, 2013.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 545-566.

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

DOBERMANN, A. **Nitrogen use efficiency – State of the art**. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt, Germany. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. 16 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de GHEYI, H. R.; SOUSA, A. A.; DAMASCENO, F. A. V.; MEDEIROS, J. F. Campina Grande: UFPB, 1994. p. 154-159. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33).

DOURADO NETO, D.; PALHARES, M.; VIEIRA, P. A.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P.; ROMANO, M. R. Efeito na população de plantas e do espaçamento sobre a produtividade de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, p. 63-77, 2003.

DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; TRIVELIN, P. C. O.; AMBROSANO, E. J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (^{15}N) 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**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Editora Planta, 2006. 403 p.

ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. A forma de aplicação da ureia e dos resíduos vegetais afeta a disponibilidade de nitrogênio. **Ciência Rural**, v. 35, p. 360-365, 2005.

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

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, v. 88, p. 97-185, 2005.

FANCELLI, A. L. Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes na cultura de milho. **Informações agronômicas**, n. 131, 2010. 24 p.

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

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

FARINELLI, R.; LEMOS, L. B. Produtividade e eficiência agronômica do milho em função da adubação nitrogenada e manejos do solo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 9, p. 135-146, 2010.

FERNANDES, F. C. S.; BUZETTI, S.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. C. Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, p. 195-204, 2005.

FERREIRA, A. C. B.; ARAÚJO, G. A. A.; PEREIRA, P. R. G.; CARDOSO, A. A. Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 131-138, 2001.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007. 576 p.

FRYE, W. **Nitrification inhibition for nitrogen efficiency and environment protection**. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt, Germany. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. 8 p.

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

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

GEISSELER, D.; LAZICKI, P. A.; PETTYGROVE, G. S.; LUDWIG, B.; BACHAND, P. A. M.; HORWATH, W. R. Nitrogen dynamics in irrigated forage systems fertilized with liquid dairy manure. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 897-907, 2012.

GOES, R. J.; RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O.; VILELA, R. G. Nitrogênio em cobertura para o milho (*Zea mays* L.) em sistema plantio direto na safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, p. 169-177, 2012.

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

GRANT, C. **Policy aspects related to the use of enhanced-efficiency fertilizers: Viewpoint of the scientific community.** In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt, Germany. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. 11 p.

GROSS, M. R.; VON PINHO, R. G.; BRITO, A. H. Adubação nitrogenada, densidade de semeadura e espaçamento entre fileiras na cultura do milho em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 387-393, 2006.

HALL, W. **Benefits of enhanced-efficiency fertilizers for the environment.** In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt, Germany. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. 9 p.

HODGEN, P. J.; FERGUSON, R. B.; SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S. Uptake of point source depleted ^{15}N fertilizer by neighboring corn plants. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 99-105, 2009.

KRISTENSEN, H. L.; THORUP-KRISTENSEN, K. Uptake of ^{15}N labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2-2.5 meters depth. **Plant and Soil**, v. 265, p. 93-100, 2004.

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, p. 1177-1183, 2003.

JAYNES, D. B.; COLVIN, T. S. Corn yield and nitrate loss in subsurface drainage from midseason nitrogen fertilizer application. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 1479-1487, 2006.

JEMISON, J. M.; LYTLE, D. E. Field evaluation of two nitrogen testing methods in maize. **Journal of Production Agriculture**, v. 9, p. 106-113, 1996.

KAPPES, C.; ANDRADE, A. C.; ARF, O.; OLIVEIRA, A. C.; ARF, M. V.; FERREIRA, J. P. Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**, v. 70, p. 334-343, 2011.

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

KÖPPEN, W. **Das geographische system der klimatologie**: Handbuch der klimatologie. Berlin: Gebruder Borntrager, 1936. 44 p.

KUNZ, J. H.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECLKER, B. M. M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1511-1520, 2007.

LANA, M. C.; RAMPIM, L.; OHLAND, T.; FÁVERO, F. Spacing, population density and nitrogen fertilization in corn grown in a Oxisol. **Revista Ceres**, v. 61, p. 424-433, 2014.

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

LI-MIN, C.; TONG-KE, Z.; ZHI-ZHUANG, A.; LIAN-FENG, D.; SHUN-JIANG, L. Effects of a urease inhibitor NBPT on the growth and quality of rape. In: 19th WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, SOIL SOLUTIONS FOR A CHANGING WORLD, 19., 2010, Brisbane. **Annals...** Brisbane: International Union of Soil Sciences, 2010. p. 50-52.

LOURENTE, E. R. P.; ONTOCELLI, R.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; MARCHETTI, M. E.; RODRIGUES, E. T. Culturas antecessoras, doses e fontes de nitrogênio nos componentes de produção do milho. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, p. 55-61, 2007.

MAÇÃS, J. E. S. **Nitrogênio nítrico e amoniacal no desenvolvimento da parte aérea de milho cultivado em argissolo**. 2008. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MAGALHÃES, P. C.; JONES, R. Aumento de fotoassimilados na taxa de crescimento e peso final dos grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 25, p. 1747-1754, 1990.

MALAVOLTA, E. Elementos da nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p. _____. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. 631 p.

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

MANSOURI-FAR, C.; SANAVY, S. A. M. M.; SABERALI, S. F. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 12-22, 2010.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Elsevier, 2012. 643 p.

MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L.; BARIONI, L. G.; SOUSA, D. M. G.; BARCELLOS, A. O. Manejo da adubação nitrogenada em pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Fealq, 2004. p. 155-215.

MATZENAUER, R.; WESTPHALEN, S. L.; BERGAMASCHI, H. Relações entre a evapotranspiração do milho e as fórmulas de Pennan e Thornthwaite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 18, p. 1207-1214, 1983.

MAYER, L. I.; ROSSINI, M. A.; MADDONNI, G. A. Inter-plant variation of grain yield components and kernel composition of maize crops grown under contrasting nitrogen supply. **Field Crops Research**, v. 125, p. 98-108, 2012.

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

MEIRA, F. A.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; ARF, O.; SÁ, M. E.; ANDRADE, J. A. C. Fontes e épocas de aplicação do nitrogênio na cultura do milho irrigado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, p. 275-284, 2009.

MELO, F. B.; CORÁ, J. E.; CARDOSO, M. J. Fertilização nitrogenada, densidade de plantas e rendimento de milho cultivado no sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 27-31, 2011.

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.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849 p.

OHLAND, R. A. A.; SOUZA, L. C. F.; HERNANI, L. C.; MARCHETTI, M. E.; GONÇALVES, M. C. Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, p. 538-544, 2005.

OKUMURA, R. S.; MARIANO, D. C.; ZACCHEO, P. V. C.; ALBUQUERQUE, A. N.; GIEBELMEIER, C. G.; LOBATO, A. K. S.; FRANCO, A. A. N.; OLIVEIRA NETO, C. F.; SALDANHA, E. C. M.; CONCEIÇÃO, H. E. O.; SILVA, R. T. L. Efficiency of utilization of nitrogen coated with urease inhibitor in maize. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 16, p. 871-876, 2013a.

OKUMURA, R. S.; YANO, G. T.; MARIANO, D. C.; ZACCHEO, P. V. C.; TAKAHASHI, H. W. Nutrição nitrogenada no milho fertilizado com ureia tratada com inibidor de urease. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, p. 157-170, 2013b.

OKUMURA, R. S.; TAKAHASHI, H. W.; SANTOS, D. G. C.; LOBATO, A. K. S.; MARIANO, D. C.; MARQUES, O. J.; SILVA, M. H. L.; OLIVEIRA NETO, C. F.; LIMA JUNIOR, J. A. Influence of different nitrogen levels on growth and production parameters in maize plants. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 9, p. 510-514, 2011.

OSCAR, R. V.; TOLLENAR, M. Effect of acquisition of resources needed for growth and genotype, nitrogen, plant density and row spacing development. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 94-99, 2006.

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

PIEKIELEK, W. P.; FOX, R. H. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. **Agronomy Journal**, v. 84, p. 59-65, 1992.

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

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade do solo**. Campinas: IAC, 2001. 285 p.

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: IAC, 1996. 285 p.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops**. Ames: State University of Science and Technology, 1993. 21 p. (Special Report, 48).

ROSSA, U. B. Fertilizante de liberação lenta no desenvolvimento de mudas de Paricá. **Revista da Madeira**, v. 115, p. 114-115, 2008.

ROSSINI, M. A.; MADDONNI, G. A.; OTEGUI, M. E. Inter-plant variability in maize crops grown under contrasting N x stand density combinations: links between development, growth and kernel set. **Field Crops Research**, v. 133, p. 90-100, 2012.

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

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

SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; SILVA, P. R. F.; SCHMITT, A.; VARGAS, V. P.; CASA, R. T.; SOUZA, C. A. Perfilhamento, área foliar e produtividade do milho sob diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 609-616, 2011.

SANGOI, L.; SILVA, L. M. M.; MOTA, M. R.; PANISON, F.; SCHMITT, A.; SOUZA, N. M.; GIORDANI, W.; SCHENATTO, D. E. Desempenho agrônômico do milho em razão do tratamento de sementes com *Azospirillum sp.* e da aplicação de doses de nitrogênio mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1141-1150, 2015.

SANTOS, P. G.; JULIATTI, F. C.; BUIATTI, A. L.; HAMAWAKI, O. T. Avaliação do desempenho agrônômico de híbridos de milho em Uberlândia, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 597-602, 2002.

SANZ-COBENA, A.; MISSELBROOK, T.; CAMP, V.; VALLEJO, A. Effect of water addition and the urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea. **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 1517-1524, 2011.

SCHLEGEL, A. J.; NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Field evaluation of urease inhibitors for corn production. **Agronomy Journal**, v. 78, p. 1007-1012, 1986.

SCHREIBER, H. A.; STANBERRY, C. O.; TUCKER, H. Irrigation and nitrogen effects on sweet corn row number at various growth stages. **Science**, v. 135, p. 135-136, 1988.

SILVA, A. A.; SILVA, T. S.; VASCONCELOS, A. C. P.; LANA, R. M. Q. Aplicação de diferentes fontes de ureia de liberação gradual na cultura do milho. **Bioscience Journal**, v. 28, sup. 1, p. 104-111, 2012.

SILVA, E. C.; FERREIRA, S. M.; SILVA, G. P.; ASSIS, R. L.; 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, 2005a.

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

SILVA, E. C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; TRIVELIN, P. C. O. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 477-486, 2006.

SILVEIRA, M. L.; HABY, V. A.; LEONARD, A. T. Response of coastal bermudagrass yield and nutrient uptake efficiency to nitrogen sources. **Agronomy Journal**, v. 99, p. 707-714, 2007.

SKINNER, R. H.; NELSON, C. J. Estimation of potential tiller production and usage during tall fescue canopy development. **Annals of Botany**, v. 70, p. 493-499, 1992.

SMEAL, D.; ZHANG, H. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, p. 1495-1503, 1994.

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

SOUZA, E. F. C.; SORATTO, R. P. Efeito de fontes e doses de nitrogênio em cobertura, no milho safrinha, em plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, p. 387-397, 2006.

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...** Londrina: Embrapa Soja, SBCS, IAPAR, UEL, 2008. 1 CD-ROM.

SOUZA, J. A.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ANDREOTTI, M.; SÁ, M. E.; ARF, O. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha irrigado em plantio direto. **Bragantia**, v. 70, p. 447-454, 2011.

STUTE, J. K.; POSNER, J. L. Synchrony between legume nitrogen release and corn demand in the Upper Midwest. **Agronomy Journal**, v. 87, p. 1063-1069, 1995.

SUNDERMAN, H. D.; PONTUS, J. S.; LAWLESS, J. R. Variability in leaf chlorophyll concentration among full-fertilized corn hybrids. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 28, p. 1793-1803, 1997.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Sundervland: Sinauer Associates, 2010. 782 p.

THOMISON, P. R.; MULLEN, R. W.; LIPPS, P. E.; DOERGE, T.; GEYER, A. B. Corn response to harvest date as affected by plant population and hybrid. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 1765-1772, 2011.

TRENKEL, M. E. **Improving fertilizer use efficiency: Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture**. Paris: IFA, 1997. 151 p.

TRENKEL, M. E. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. 2. ed. Paris: IFA, 2010. 160 p.

VARVEL, G. E.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D. Ability for inseason correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 1233-1239, 1997.

VELOSO, M. E. C.; DUARTE, S. N.; DOURADO NETO, D.; MIRANDA, J. H.; SILVA, E. C.; SOUSA, V. F. Doses de nitrogênio na cultura do milho, em solos de várzea, sob sistema de drenagem subterrânea. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, p. 382-394, 2006.

VELOSO, M. E. C.; DUARTE, S. N.; DOURADO NETO, D.; SILVA, E. C.; PEREIRA, C. R. Teor de nitrogênio, índices de área foliar e de colheita, no milho, em função da adubação nitrogenada, em solo de várzea. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, p. 13-25, 2009.

VILLAS BÔAS, R. L.; BOARETTO, A. E.; BULL, L. T.; GUERRINI, I. A. Parcelamento e largura da faixa de aplicação da ureia na recuperação do nitrogênio pela planta de milho. **Scientia Agricola**, v. 56, p. 1177-1184, 1999.

VOLENEC, J. J.; NELSON, C. J. Carbohydrate metabolism in leaf meristems of tall fescue. II. Relationship to leaf elongation rates modified by nitrogen fertilization. **Plant Physiology**, v. 74, p. 595-600, 1984.

WOLSCHICK, D.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; JADOSKI, S. O. Adubação nitrogenada na cultura do milho no sistema plantio direto em ano com precipitação pluvial normal e com "El Niño". **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 27, p. 461-468, 2003.

YAMADA, T. Adubação nitrogenada do milho: Quanto, como e quando aplicar. **Informações Agronômicas**, n. 74, 1996. 5 p.

ZAMAN, M.; NGUYEN, M. L.; BLENNERHASSETT, J. D. The effect of different rates of urea with or without urease inhibitor (NBPT) on wheat yield and quality. **Agricultural Journal**, v. 5, p. 309-312, 2010.

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, p. 79-84, 2001.

ZHANG, H.; CHEN, T.; WANG, Z.; YANG, J.; ZHANG, J. Involvement of cytokinins in the grain filling of rice under alternate wetting and drying irrigation. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, p. 3719-3733, 2010.