

# Adubação nitrogenada em cobertura para o cultivo de milho com alto potencial produtivo em sistema de plantio direto de longa duração

## Nitrogen fertilization in top dressing for corn crop with high yield potential under a long-term no-till system

Eduardo Fávero Caires<sup>1\*</sup>, Robert Milla<sup>2</sup>

1. Universidade Estadual de Ponta Grossa - Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola - Ponta Grossa (PR), Brasil.

2. Universidade Estadual de Ponta Grossa - Curso de Agronomia - Ponta Grossa (PR), Brasil.

**RESUMO:** A intensificação da produção para elevar a produtividade de milho tem aumentado a demanda por fertilizantes nitrogenados. Com o objetivo de avaliar a acidificação do solo e definir as doses de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) de N-ureia em cobertura para obtenção de alta produtividade de milho, realizou-se um experimento no município de Candói (PR), em um Latossolo Vermelho de textura argilosa sob plantio direto de longa duração (30 anos). Os tratamentos, dispostos em blocos ao acaso com 4 repetições, constaram de 5 doses de nitrogênio (N), na forma de ureia: 0, 90, 180, 270 e 360 kg·ha<sup>-1</sup>, aplicadas em cobertura no estágio de desenvolvimento V4. O milho, híbrido P1630, foi cultivado após aveia-preta, em 2012, com 65 kg N·ha<sup>-1</sup> na sementeira. A aplicação de N, na forma de ureia, reduziu o pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>, os teores de Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> trocáveis, a capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva e a saturação por bases do solo. Os teores de N nas folhas e nos grãos, a altura das plantas e da inserção da espiga, o número de grãos por fileira, a massa de grãos por espiga, a massa de 1.000 grãos e a exportação de N pelos grãos de milho aumentaram linearmente com as doses de N em cobertura. A produtividade de milho aumentou com as doses de N, de acordo com o modelo *Linear Response Plateau*. A MET e a MEE seriam obtidas com a dose de 209 kg N·ha<sup>-1</sup> em cobertura para produtividade de 19,6 t·ha<sup>-1</sup> de milho.

**Palavras-chave:** *Zea mays* L., nitrogênio, ureia, nutrição, alta produtividade.

**ABSTRACT:** Agricultural intensification to increase corn yield has increased the demand for nitrogen fertilizers. A field experiment was carried out in Candói, Paraná State, Brazil, on a clayey Typic Hapludox (Oxisol) under a long-term continuous no-till (30 years) to evaluate the effects of nitrogen (N) fertilization as urea in top dressing on soil acidification and determine the N-urea rates of maximum technical yield (MTY) and maximum economic yield (MEY) for obtaining high corn yield. A randomized complete block design was used, with four replications. The treatments consisted of N-urea application in top dressing at the rates of 0, 90, 180, 270, and 360 kg·ha<sup>-1</sup>. Urea was applied in the V4 stage of the crop corn. Corn, hybrid P1630, was cultivated after black oat in 2012, with 65 kg N·ha<sup>-1</sup> at sowing. The N application as urea decreased the soil pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub>, the exchangeable Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> levels, the effective cation-exchange capacity (CEC) and the soil base saturation. The N content in leaves and grains, the plant and ear height, the number of grains per row, the mass of grains per ear, the 1,000-grain mass, and the N export by grain of corn increased linearly with increasing N rate applied in top dressing. Corn yield increased with N rates as the Linear Response Plateau model and stabilized at 19.6 t·ha<sup>-1</sup>. The MTY and MEY would be obtained at a rate of 209 kg N·ha<sup>-1</sup> in top dressing.

**Key words:** *Zea mays* L., nitrogen, urea, nutrition, high yield.

\*Autor correspondente: [efcaires@uepg.br](mailto:efcaires@uepg.br)

Recebido: 20 Abr. 2015 – Aceito: 3 Set. 2015

## INTRODUÇÃO

O aporte de elevada quantidade de resíduos vegetais ao solo é um dos principais requisitos para o sucesso do plantio direto em condições tropicais e subtropicais. Por isso, tem-se buscado inserir na rotação de culturas espécies com elevada capacidade de produção de massa. A aveia-preta é uma gramínea anual e bastante rústica que tem sido muito empregada como planta de cobertura no sistema plantio direto, antecedendo as culturas de soja ou milho (Derpsch e Calegari 1992; Pöttker e Roman 1994), nos Estados da Região Sul do Brasil, Sudoeste de São Paulo e Sul de Mato Grosso do Sul.

O nitrogênio (N) é o nutriente absorvido em maior quantidade pela cultura do milho. As principais reações bioquímicas em plantas envolvem a presença de N, o que acarreta grande demanda do nutriente (Cantarella 2007). Aumentos na produtividade de milho com a adubação nitrogenada têm sido reportados em diversos trabalhos realizados no Brasil (Sangoi e Almeida 1994; Oliveira e Caires 2003; Fernandes et al. 2005; Lange et al. 2006; Gomes et al. 2007; Queiroz et al. 2011; Silva et al. 2011; Soratto et al. 2011). Na China, Zhu e Chen (2002) destacaram a importância do uso de fertilizantes nitrogenados na produção de alimentos ao obterem correlação positiva entre o aumento de N aplicado e as produtividades alcançadas no país em 50 anos.

Apesar da incontestável importância dos fertilizantes nitrogenados para o aumento da produção agrícola, grandes dificuldades ainda existem na definição de doses mais econômicas de N para a cultura do milho, especialmente quando altas produtividades são esperadas. Além disso, o uso de fertilizantes contendo amônio ou ureia ocasiona acidificação do solo, principalmente quando doses elevadas são empregadas no sistema de produção (Lange et al. 2006; Costa et al. 2008; Caires et al. 2015).

Nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (Amado et al. 2002) e na região Centro-Sul do Paraná (Fontoura e Bayer 2009), as recomendações de N para a cultura do milho têm sido baseadas no teor de matéria orgânica (MO) do solo e na cultura antecessora (gramínea, leguminosa ou consórcio), considerando determinados tetos de produtividade. Porém, as recomendações de adubação nitrogenada com base nos teores de MO do solo não apresentam grande confiabilidade pelo fato de esse tipo de recomendação se basear em taxas constantes de mineralização e liberação de N, o que não é real, visto que os fatores climáticos e de manejo interferem

nos valores considerados nesses estudos (Rajj 2011). Sendo assim, as recomendações de adubação nitrogenada devem ser realizadas com base em curvas de resposta, histórico da área e produtividade esperada (Coelho et al. 2006; Rajj 2011).

Considerando que pouco se conhece a respeito da necessidade de N para a obtenção de altos tetos de produtividade de milho e que a adubação nitrogenada acidifica o solo, este trabalho foi realizado com os objetivos de (i) avaliar as alterações químicas do solo relacionadas à acidez e a resposta do milho em função de doses de N em cobertura e (ii) definir as doses de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) de N em cobertura para maximizar a produtividade de milho, cultivado após aveia-preta, em sistema plantio direto de longa duração.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no município de Candói (PR), na Fazenda Mariédia (25°22'S, 51°46'W), em um Latossolo Vermelho de textura argilosa. De acordo com o Sistema Köppen-Geiger (Peel et al. 2007), o clima da região é do tipo Cfb, com verões frescos e geadas frequentes durante o inverno. A altitude média é de 984 m e as temperaturas médias, máxima e mínima, são de 22 °C e 13 °C, respectivamente. A precipitação pluvial anual histórica média varia de 1.800 a 2.000 mm. Análises químicas (Pavan et al. 1992) e granulométricas (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária 1997) do solo, da camada de 0 – 20 cm, realizadas antes da instalação do experimento, revelaram os seguintes resultados: pH (CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol·L<sup>-1</sup>) 5,4; 72 mmol<sub>c</sub>·dm<sup>-3</sup> de H + Al; 77 mmol<sub>c</sub>·dm<sup>-3</sup> de Ca<sup>2+</sup>; 38 mmol<sub>c</sub>·dm<sup>-3</sup> de Mg<sup>2+</sup>; 6,0 mmol<sub>c</sub>·dm<sup>-3</sup> de K<sup>+</sup>; 5,8 mg·dm<sup>-3</sup> de P (Mehlich-1); 86 g·dm<sup>-3</sup> de MO e 63% de saturação por bases e teores de argila, silte e areia, respectivamente, de 590, 190 e 220 g·kg<sup>-1</sup>.

O sistema plantio direto foi estabelecido na área experimental em 1982. Após o seu estabelecimento, utilizaram-se, na rotação de culturas, aveia-preta, trigo ou cevada durante a estação de outono – inverno e milho ou soja durante a estação de primavera – verão. No período de 2010 a 2012, a área foi cultivada com aveia-preta (2010), milho (2010 – 2011), cevada (2011), soja (2011 – 2012) e aveia-preta (2012). A aveia-preta foi cultivada sem adubação, e as seguintes quantidades de fertilizantes (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) foram aplicadas nas culturas de milho (2010 – 2011), cevada (2011) e soja (2011 – 2012), respectivamente: 285-155-85, 65-175-55

e 0-108-120. A adubação empregada foi relativamente elevada, considerando os níveis de nutrientes existentes no solo, para adequada reposição de nutrientes visando à manutenção de alta fertilidade do solo.

O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso, com cinco tratamentos e quatro repetições. O tamanho das parcelas foi de  $4 \times 8$  m. Os tratamentos foram constituídos de 5 doses de N, na forma de ureia, em cobertura: 0, 90, 180, 270 e  $360 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . As doses de N foram aplicadas no estágio  $V_4$  de desenvolvimento do milho, no dia 20 de outubro de 2012, antecedendo uma chuva de 20 mm. A ureia foi distribuída manualmente, em uma única aplicação, sobre a área total das parcelas.

O milho (*Zea mays* L.), híbrido P1630, foi semeado em 24 de setembro de 2012, em linhas espaçadas de 0,50 m, utilizando-se  $84.000$  sementes  $\text{ha}^{-1}$ . A população final foi de  $83.200$  plantas  $\text{ha}^{-1}$ . Aplicaram-se  $65 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de N,  $165 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $55 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  por ocasião da semeadura. No estágio  $V_5$  de desenvolvimento do milho, realizou-se aplicação de herbicidas, utilizando-se  $100,8 \text{ mL}\cdot\text{ha}^{-1}$  de tembotriona,  $1,75 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$  de atrazina,  $720 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$  de éster metílico de óleo de soja e  $50 \text{ mL}\cdot\text{ha}^{-1}$  de etilenoxi.

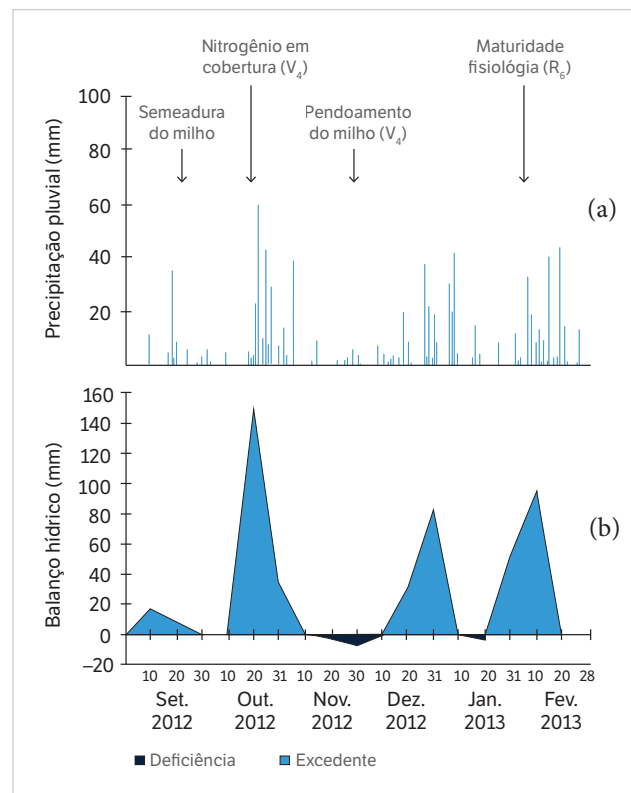
O híbrido P1630 é muito suscetível a diversas doenças fúngicas. Por esse motivo, foram feitas três aplicações de fungicidas, sendo a primeira no estágio  $V_8$  (na altura da entrada do trator), a segunda no pendoamento ( $V_T$ ) e a última no estágio de grão leitoso ( $R_2$ ), sendo que as duas últimas foram realizadas com aplicação aérea. O produto e a dose foram os mesmos nas três aplicações, tendo-se utilizado  $133 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$  de piraclostrobina,  $50 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$  de epoxiconazol e  $50 \text{ mL}\cdot\text{ha}^{-1}$  de espalhante adesivo siliconado.

Os dados de precipitação pluvial diária e o balanço hídrico decendial (Figuras 1a, b) revelaram que as chuvas foram relativamente bem distribuídas, tendo ocorrido pequena deficiência hídrica ( $8,6 \text{ mm}$ ) somente por ocasião do pendoamento da cultura do milho ( $V_T$ ). Porém, o excedente hídrico acumulado durante o ciclo da cultura do milho foi de  $470 \text{ mm}$ . O balanço hídrico sequencial decendial foi calculado por meio de programa desenvolvido por Rolim et al. (1998), considerando a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura do milho de  $50 \text{ cm}$  e a capacidade de água disponível (CAD) de  $100 \text{ mm}$  (Pereira et al. 2002).

No florescimento do milho, foram coletadas amostras de folhas em 30 plantas por parcela para constituir uma amostra composta. Em cada planta, retirou-se a folha imediatamente abaixo e oposta à espiga. As extremidades e a nervura central

foram excluídas. As amostras de folhas foram lavadas em água deionizada, colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar a  $60^\circ\text{C}$ , até atingir massa constante, e moídas. Determinou-se o teor de N nas folhas, conforme os métodos descritos em Malavolta et al. (1997).

Por ocasião da maturidade fisiológica da cultura do milho, avaliaram-se a altura da planta (da base da planta até o último nó) e a altura de inserção da espiga em dez plantas de cada parcela. Em seguida, foram coletadas dez espigas das mesmas plantas, para avaliar os seguintes componentes de produção: número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira e massa de grãos por espiga. Depois disso, realizou-se a colheita manual com posterior trilhagem em máquina debulhadora estacionária. Para avaliar a produtividade de grãos, foram colhidos  $12 \text{ m}^2$  centrais de cada parcela (6 linhas com  $4 \text{ m}$  de comprimento). Após a debulha, os grãos foram pesados, determinando-se, então, a produtividade de grãos a  $130 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  de umidade. Com os grãos debulhados, a massa de  $1.000$  grãos foi determinada, corrigindo-se a umidade também para  $130 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Em seguida, os grãos foram colocados para secar em estufa com circulação forçada de ar a  $60^\circ\text{C}$ , até atingir massa



**Figura 1.** Precipitação pluvial diária (a) e balanço hídrico decendial (b) durante o período de desenvolvimento da cultura do milho no campo.

constante, e moidos para a determinação do teor de N, conforme os métodos descritos em Malavolta et al. (1997).

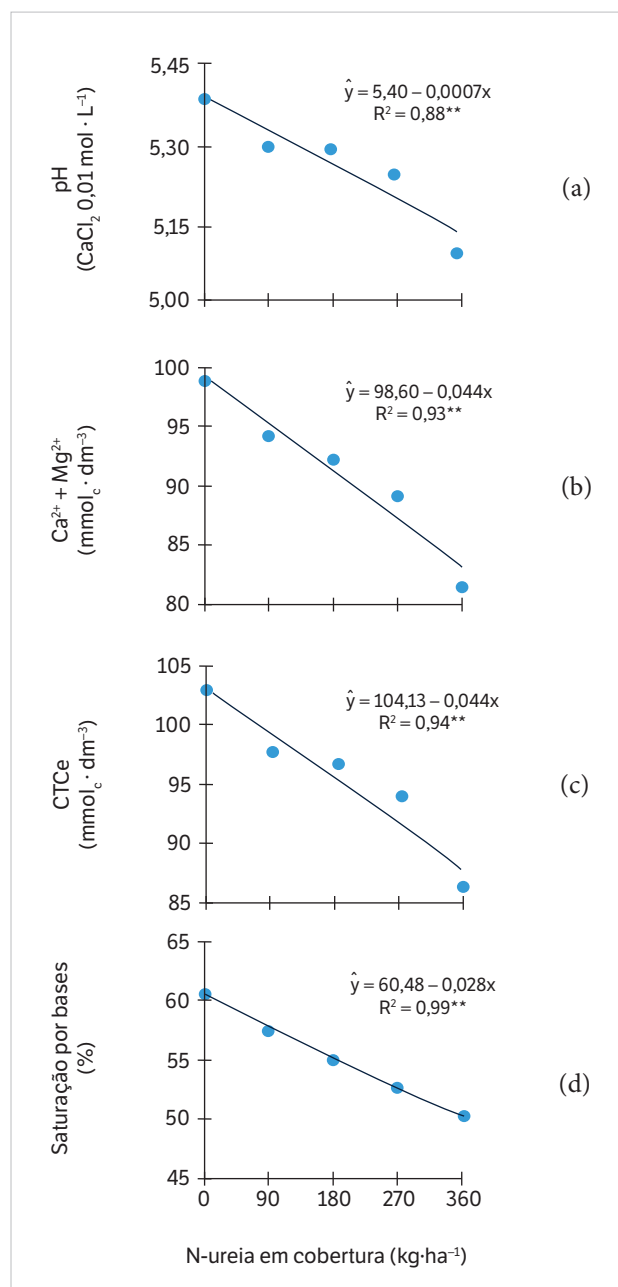
Amostras de solo foram coletadas logo após a colheita do milho, retirando-se, por meio de trado calador, 12 subamostras por parcela para constituir uma amostra composta da camada de 0 – 20 cm. As amostras foram colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C e passadas em peneira com malha de 2 mm. Determinaram-se o pH em  $\text{CaCl}_2$ , a acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ), a acidez potencial ( $\text{H} + \text{Al}$ ) e os teores de cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ), de acordo com os métodos descritos em Pavan et al. (1992).

Os resultados foram submetidos às análises de variância e de regressão. Equações de regressão foram ajustadas aos dados obtidos em função das doses de N aplicadas em cobertura. Os ajustes foram realizados por meio dos modelos de regressão linear, quadrático ou *Linear Response Plateau* descritos em Braga (1983). Adotou-se como critério para a escolha do modelo a magnitude dos coeficientes de determinação das regressões significativas a 5%. As análises estatísticas foram realizadas por meio da utilização dos programas ASSISTAT, para regressão polinomial, e SAEG, para *Linear Response Plateau*.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho reduziram linearmente o  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ , os teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  trocáveis, a capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva e a saturação por bases do solo (Figura 2). Os resultados mostraram que houve redução de 0,07 unidades no  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  (Figura 2a), de 4,4  $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$  nos teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  trocáveis (Figura 2b) e na CTC efetiva (Figura 2c), e de 2,8% na saturação por bases do solo (Figura 2d), na camada de 0 – 20 cm, para cada 100  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de N adicionados na forma de ureia em cobertura. Com base nesses resultados, é possível inferir que, para cada 100  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de N, na forma de ureia, aplicados em cobertura, seriam necessários 440  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 100% para combater a acidez gerada pela adubação nitrogenada. Lange et al. (2006) também verificaram que a adição de doses de N na cultura do milho reduziu os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis na camada superficial do solo, ocasionando consequente diminuição na saturação por bases. O emprego de fertilizantes nitrogenados amoniacais ou de ureia, que gera amônio por sua hidrólise, intensifica a acidificação

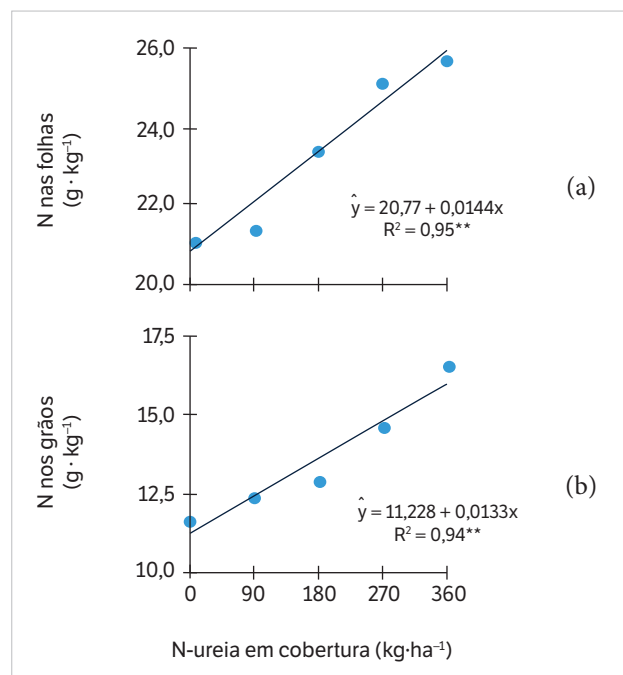
do solo (Costa et al. 2008) porque, no processo de nitrificação, cada molécula de  $\text{NH}_4^+$  que é oxidada a  $\text{NO}_3^-$  libera dois prótons ( $\text{H}^+$ ). Os íons  $\text{H}^+$  liberados no sistema passam a ocupar as cargas negativas existentes nas partículas coloidais do solo, enquanto o ânion  $\text{NO}_3^-$  pode formar pares iônicos com os cátions liberados do complexo de troca catiônica,



**Figura 2.** Valores de pH em  $\text{CaCl}_2$  (a),  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  trocáveis (b), CTC efetiva (c) e saturação por bases (d) do solo, na camada de 0 – 20 cm, considerando-se as doses de N, na forma de ureia, aplicadas em cobertura no sistema plantio direto. As doses de N foram aplicadas no estágio  $V_4$  de desenvolvimento da cultura do milho, e as amostras de solo foram coletadas após a colheita. \*\* $p < 0,01$ .

os quais são lixiviados com o fluxo descendente de água (Lange et al. 2006; Fernandes et al. 2007). Como no presente estudo foram empregadas doses relativamente altas de N em cobertura, houve significativa acidificação do solo decorrente da remoção dos cátions básicos.

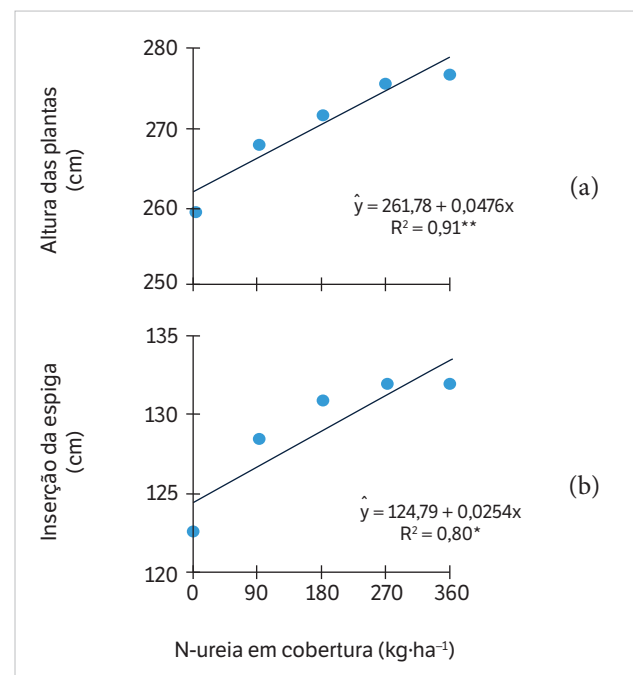
As concentrações de N nas folhas (Figura 3a) e nos grãos (Figura 3b) de milho foram linearmente aumentadas com as doses de N aplicadas em cobertura. O crescimento das plantas de milho é diretamente dependente da área fotossintética, a qual tem uma estreita relação com a extensão da área foliar e o tempo de permanência das folhas em plena atividade fotossintética (Gomes et al. 2007). Por esse motivo, quando se aumentam as doses de N em cobertura, o teor de N nas folhas também é aumentado, podendo maximizar o processo fotossintético e, conseqüentemente, a produtividade de grãos. Em vários estudos realizados com a cultura do milho, as doses de N aplicadas aumentaram o teor de N nas folhas, de modo linear (Oliveira e Caires 2003; Lange et al. 2006; Gomes et al. 2007; Valderrama et al. 2011) ou conforme o modelo quadrático (Silva et al. 2011; Soratto et al. 2011). Aumento linear no teor de N nos grãos de milho em função do emprego de doses de N também foi constatado por Silva et al. (2011).



**Figura 3.** Concentrações de N nas folhas (a) e nos grãos de milho (b), considerando-se as doses de N, na forma de ureia, aplicadas em cobertura no sistema plantio direto. As doses de N foram aplicadas no estágio V<sub>4</sub> de desenvolvimento da cultura do milho. \*\*p < 0,01.

As doses de N empregadas em cobertura aumentaram linearmente a altura das plantas (Figura 4a) e da inserção da espiga (Figura 4b) de milho. Embora a maior estatura das plantas possa favorecer o seu acamamento, no presente estudo não ocorreu acamamento das plantas com as doses de N aplicadas. Aumentos no crescimento das plantas e na altura da inserção da espiga com a adição de doses de N na cultura do milho têm sido constatados em vários trabalhos (Sangoi e Almeida 1994; Silva et al. 2003; Gomes et al. 2007).

O número de grãos por fileira, a massa de grãos por espiga e a massa de 1.000 grãos de milho aumentaram linearmente com as doses de N aplicadas em cobertura (Figura 5). O número de fileiras por espiga não foi significativamente alterado com as doses de N, tendo-se obtido, em média, 18,9 fileiras por espiga (Figura 5a). Esse resultado era esperado, considerando-se que o número de fileiras por espiga é um componente dependente da característica genética do genótipo (Fernandes et al. 2005; Valderrama et al. 2011). O número de grãos por fileira aumentou significativamente com o emprego das doses de N (Figura 5b), tendo-se obtido coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) muito estreito (0,99). Isso demonstra que a adubação nitrogenada



**Figura 4.** Altura das plantas (a) e da inserção da espiga de milho (b), considerando-se as doses de N, na forma de ureia, aplicadas em cobertura no sistema plantio direto. As doses de N foram aplicadas no estágio V<sub>4</sub> de desenvolvimento da cultura do milho. \*p < 0,05 e \*\*p < 0,01.

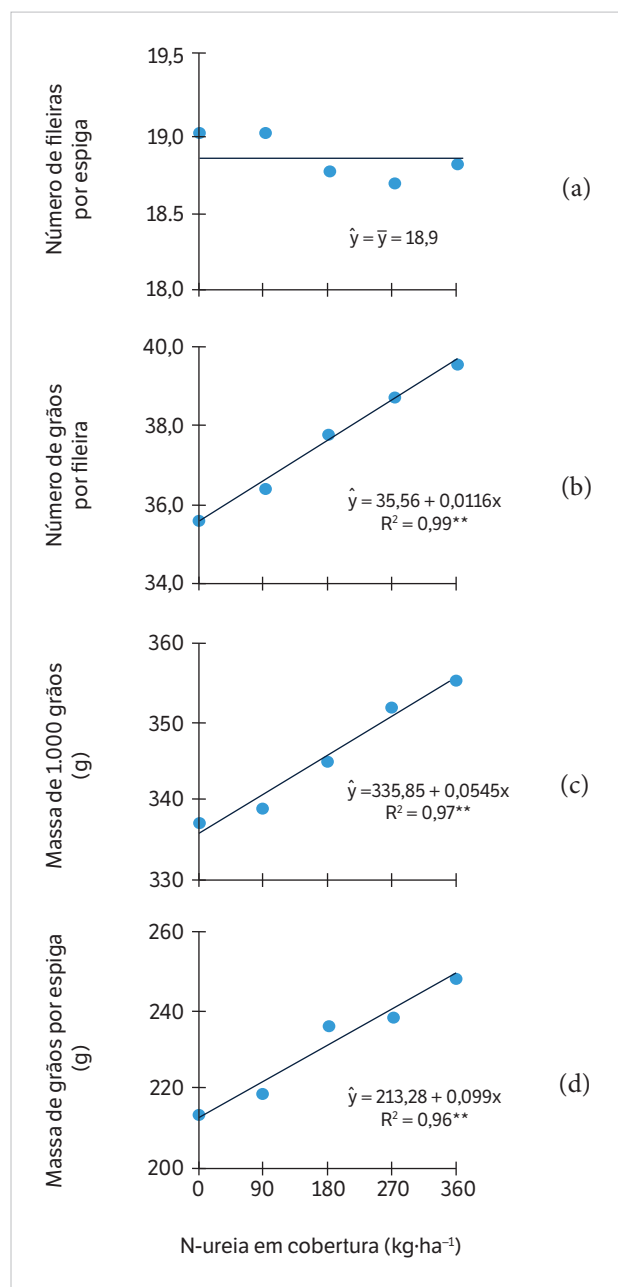
exerceu forte influência no número de grãos por fileira. Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira e Caires (2003); porém, em alguns trabalhos, tal resposta não foi significativa (Fernandes et al. 2005; Valderrama et al. 2011). Entretanto, nos estudos em que se avaliou o número de grãos por espiga, o qual depende do número de fileiras por espiga e de grãos por fileira, houve aumento significativo desse componente com as doses de N aplicadas (Sangoi e Almeida 1994; Silva et al. 2003; Soratto et al. 2011). Assim, maiores produtividades de grãos de milho em resposta à adubação nitrogenada podem ser decorrentes do aumento no número de grãos por fileira.

A massa de 1.000 grãos de milho foi outro componente de produção estreitamente relacionado ( $R^2 = 0,97$ ) com o aumento das doses de N em cobertura (Figura 5c). Em vários estudos, foram observados resultados semelhantes, com aumento significativo na massa de 1.000 grãos de milho quando se aumentou a dose de N (Sangoi e Almeida 1994; Oliveira e Caires 2003; Fernandes et al. 2005; Queiroz et al. 2011). Entretanto, em outras condições experimentais, tal resposta não foi significativa (Silva et al. 2003; Valderrama et al. 2011). Acontece que, após o florescimento da cultura do milho, qualquer tipo de estresse ao qual a planta seja submetida, de natureza biótica ou abiótica, pode afetar significativamente a massa de grãos. Assim, apesar da importância da massa de 1.000 grãos para a definição da produtividade do milho em resposta à adubação nitrogenada, tal resposta pode variar com as condições experimentais, especialmente, aquelas de ordem edafo-climáticas.

O aumento na massa de grãos por espiga de milho em resposta às doses de N aplicadas em cobertura (Figura 5d) foi decorrente dos incrementos ocorridos no número de grãos por fileira e na massa de 1.000 grãos. Em outros experimentos, também foram verificados aumentos significativos na massa de grãos por espiga, quando a cultura do milho foi submetida a doses crescentes de N (Sangoi e Almeida 1994; Oliveira e Caires 2003; Gomes et al. 2007).

As doses de N aplicadas em cobertura aumentaram a produtividade de grãos de milho, conforme o modelo *Linear Response Plateau* (Figura 6a). De acordo com a equação de regressão ajustada, a produtividade de milho seria aumentada linearmente em 15,21 kg de grãos por kg de N aplicado até a dose de 209 kg N·ha<sup>-1</sup> em cobertura e, a partir dessa dose, a produtividade de milho seria estabilizada em 19,6 t·ha<sup>-1</sup> de grãos (“*Plateau*”). Em vários estudos realizados

com a cultura do milho, o aumento na produtividade de grãos em função das doses de N aplicadas em cobertura ocorreu de acordo com o modelo quadrático (Sangoi e Almeida 1994; Fernandes et al. 2005; Lange et al. 2006; Gomes et al. 2007; Silva et al. 2011; Soratto et al. 2011). Como no presente estudo o modelo *Linear Response Plateau* apresentou melhor ajuste



**Figura 5.** Número de fileiras por espiga (a), número de grãos por fileira (b), massa de 1.000 grãos (c) e massa de grãos por espiga de milho (d), considerando-se as doses de N, na forma de ureia, aplicadas em cobertura no sistema plantio direto. As doses de N foram aplicadas no estágio V<sub>4</sub> de desenvolvimento da cultura do milho. \*\*p < 0,01.



e maior significância estatística do que o modelo quadrático, optou-se por não utilizar o ajuste quadrático aos dados de produtividade de milho, mesmo porque esse modelo tende a superestimar a dose de N necessária para o alcance da máxima produtividade de grãos. Em outros experimentos, foram observadas respostas lineares da produtividade de milho às doses de N aplicadas (Oliveira e Caires 2003; Silva et al. 2003; Queiroz et al. 2011; Valderrama et al. 2011); porém, nesses casos, as doses de N empregadas foram mais baixas do que as utilizadas no presente estudo.

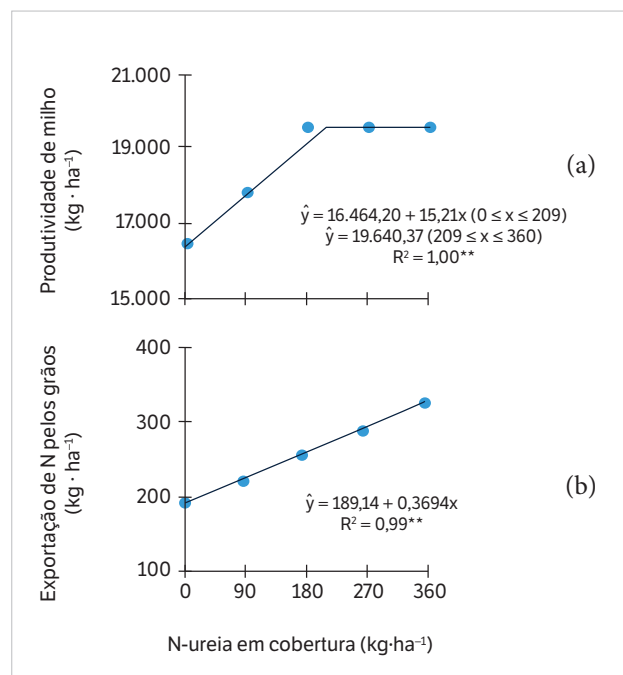
Baseando-se na resposta obtida de produtividade de grãos de milho em função das doses de N aplicadas em cobertura, a MET e a MEE ocorreriam com a dose de 209 kg N·ha<sup>-1</sup> em cobertura. Tomando-se como base os preços médios da região de Candói (PR) dos últimos 5 anos, de R\$ 2.640,00 por t de N-ureia e R\$ 338,20 por t de grãos de milho, o retorno econômico com a adubação nitrogenada seria de R\$ 2,50 por kg N·ha<sup>-1</sup> aplicado em cobertura até a dose de 209 kg N·ha<sup>-1</sup>, resultando numa receita líquida de R\$ 522,50 por ha com a aplicação da dose que ocasionou a maior produtividade (209 kg N·ha<sup>-1</sup>).

Considerando-se a produtividade relativa (PR) de 100% para a máxima produtividade de grãos alcançada com a dose de 209 kg N·ha<sup>-1</sup> em cobertura (19,6 t·ha<sup>-1</sup>), a PR de 95%

(18,6 t·ha<sup>-1</sup>) seria obtida com a dose de 144 kg N·ha<sup>-1</sup> em cobertura (Figura 6a). De acordo as equações ajustadas para concentração de N nas folhas (Figura 3a) e nos grãos (Figura 3b) de milho em função das doses de N empregadas em cobertura, é possível inferir que as concentrações de N nas folhas e nos grãos de milho seriam de 23,8 e 14,0 g·kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para PR de 100%, e de 22,8 e 13,1 g·kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para PR de 95%. Admitindo-se o intervalo de suficiência nutricional entre 95 e 100% da PR, a faixa adequada de teores de N para altos tetos de produtividade de grãos de milho seria de 22,8 a 23,8 g·kg<sup>-1</sup> nas folhas e de 13,1 a 14,0 g·kg<sup>-1</sup> nos grãos. Os teores de suficiência de N nas folhas obtidos no presente estudo (22,8 a 23,8 g N·kg<sup>-1</sup>) foram menores do que aqueles preconizados para a cultura do milho (27,0 a 35,0 g N·kg<sup>-1</sup>), para tetos de produtividade mais baixos (Raij 2011). Já os teores de suficiência de N nos grãos (13,1 a 14,0 g·kg<sup>-1</sup>) ficaram próximos da média de concentração de N nos grãos encontrada para o milho cultivado no Brasil (15 g·kg<sup>-1</sup>) (Fancelli e Tsumanuma 2007). Portanto, as folhas foram mais sensíveis ao efeito de diluição de N nos tecidos em razão do maior crescimento das plantas do que os grãos de milho.

A indicação de adubação nitrogenada para o milho em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná, em solo com cultivo anterior de gramíneas e com alto teor de MO (> 60 g·dm<sup>-3</sup>), seria de 220 kg N·ha<sup>-1</sup> para uma expectativa de produtividade de grãos de 12 a 14 t·ha<sup>-1</sup> (Fontoura e Bayer 2009). No presente estudo, o solo tinha alto teor de MO (86 g·dm<sup>-3</sup>), foi anteriormente cultivado com aveia-preta e a MEE foi obtida com a dose de 209 kg N·ha<sup>-1</sup> em cobertura (Figura 6a). Como foram aplicados 65 kg N·ha<sup>-1</sup> na semeadura, o emprego de 274 kg N·ha<sup>-1</sup> seria econômico para a obtenção de elevado teto de produtividade de grãos (19,6 t·ha<sup>-1</sup>). Essa dose de N foi 25% maior do que a preconizada na região Centro-Sul do Paraná, para produtividades de milho de 12 a 14 t·ha<sup>-1</sup> (Fontoura e Bayer 2009).

Apesar de a dose de MEE ter aumentado a produtividade de grãos de milho em 19% (Figura 6a), merece destaque a elevada produtividade de grãos obtida nas parcelas sem aplicação de N em cobertura (16,5 t·ha<sup>-1</sup>). A exportação de N pela colheita dos grãos de milho aumentou linearmente com o incremento das doses de N em cobertura (Figura 6b). Considerando-se uma exportação média pelos grãos de 63% do N absorvido pela cultura do milho (Pauletti 2004), a extração de N pelas plantas nas parcelas que receberam somente 65 kg·ha<sup>-1</sup> de N na semeadura seria da ordem de



**Figura 6.** Produtividade de grãos (a) e exportação de N pela cultura do milho (b), considerando-se as doses de N, na forma de ureia, aplicadas em cobertura no sistema plantio direto. As doses de N foram aplicadas no estágio V<sub>4</sub> de desenvolvimento da cultura do milho. \*\*p < 0,01.

300 kg·ha<sup>-1</sup>. Constata-se, portanto, que o solo foi capaz de suprir, pelo menos, 235 kg N·ha<sup>-1</sup> durante o ciclo da cultura. Como o solo tinha 86 g·dm<sup>-3</sup> de MO, foram disponibilizados para a cultura do milho cerca de 27 kg·ha<sup>-1</sup> de N para cada 10 g·dm<sup>-3</sup> de MO no solo. Deve-se considerar que, na área do estudo, o sistema plantio direto era de longa duração (30 anos), e o solo apresentava baixa acidez (pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub> = 5,4). O plantio direto em longo prazo aumenta os teores de C e N orgânicos e a labilidade da MO, principalmente nas camadas superficiais do solo (Bayer et al. 2000; Amado et al. 2006). Além disso, a biomassa e a atividade microbiana, bem como a relação bactérias/fungos, aumentam na superfície do solo sob plantio direto de longa duração em condições de baixa acidez, resultando em maior formação de substâncias húmicas solúveis em água e aumento na taxa de mineralização e nitrificação do N (Garbuio et al. 2011).

## REFERÊNCIAS

- Amado, T. J. C., Bayer, C., Conceição, P. S., Spagnollo, E., Campos, B. H. C. e Veiga, M. (2006). Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *Journal of Environmental Quality*, 35, 1599-1607.
- Amado, T. J. C., Mielniczuk, J. e Aita, C. (2002). Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26, 241-248. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000100025>.
- Bayer, C., Mielniczuk, J., Amado, T. J. C., Martin-Neto, L. e Fernandes, S. V. (2000). Organic matter storage in a sandy clay loam acrisol affected by tillage and cropping system in Southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 54, 101-109. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00090-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00090-8).
- Braga, J. M. (1983). Avaliação da fertilidade do solo: ensaios de campo. Viçosa: Editora da UFV.
- Caires, E. F., Haliski, A., Bini, A. R. e Scharr, D. A. (2015). Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. *European Journal of Agronomy*, 66, 41-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.02.008>.
- Cantarella, H. (2007). Nitrogênio. In R. F. Novais, V. H. Alvarez, N. F. Barros, R. L. Fontes, R. B. Cantarutti e J. C. L. Neves (Eds.), *Fertilidade do solo* (p. 375-470). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Coelho, A. M., França, G. E., Pitta, G. V. E., Alves, V. M. C. e Hernani, L. C. (2006). *Nutrição e adubação do milho*. Sete Lagoas: Embrapa.
- Costa, K. A. P., Faquin, V., Oliveira, I. P., Rodrigues, C. e Severiano, E. C. (2008). Doses e fontes de nitrogênio em pastagem de capim-marandu. I - Alterações nas características químicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1591-1599. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400023>.
- Derpsch, R. e Calegari, A. (1992). *Plantas para adubação verde de inverno*. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná (Circular, 73).
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). *Manual de métodos de análise de solo*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos.
- Fancelli, A. L. e Tsumanuma, G. M. (2007). Nitrogênio e enxofre nas culturas de milho e feijão. In T. Yamada, S. R. S. Abdalla e G. C. Vitti (Eds.), *Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira* (p. 445-486). Piracicaba: IPNI Brasil.
- Fernandes, F. C. S., Arf, S. B. O. e Andrade, J. A. C. (2005). Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 4, 195-204. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v4n2p195-204>.
- Fernandes, F. C. S., Libardi, P. L. e Silva, M. M. (2007). Efeito da adubação nitrogenada nas propriedades químicas de um

## CONCLUSÃO

A aplicação de 100 kg·ha<sup>-1</sup> de N-ureia em cobertura no sistema plantio direto acidifica o solo em 2,8% da saturação por bases na camada de 0 – 20 cm.

A dose de 209 kg N·ha<sup>-1</sup> em cobertura proporciona máxima eficiência técnica e econômica para produtividade de 19,6 t·ha<sup>-1</sup> de milho, cultivado após aveia-preta, em sistema plantio direto de longa duração.

A adubação nitrogenada melhora a estatura e o estado nutricional das plantas, bem como os parâmetros da espiga de milho, exceto o número de fileiras de grãos.

As faixas adequadas de teores de N para o híbrido P1630 são de 22,8 a 23,8 g·kg<sup>-1</sup> nas folhas e de 13,1 a 14,0 g·kg<sup>-1</sup> nos grãos.



- Latossolo, cultivado com milho em sucessão à aveia-preta, na implantação do sistema plantio direto. *Acta Scientiarum*, 29, 639-647. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v29i5.741>.
- Fontoura, S. M. V. e Bayer, C. (2009). Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 1721-1732. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-068320090006000021>.
- Garbuio, F. J., Jones, D. L., Alleoni, L. R. F., Murphy, D. V. e Caires, E. F. (2011). Carbon and nitrogen dynamics in an Oxisol as affected by liming and crop residues under no-till. *Soil Science Society of America Journal*, 75, 1723-1730. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2010.0291>.
- Gomes, R. F., Silva, A. G., Assis R. L. e Pires, F. R. (2007). Efeito de doses e da época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agrônômicos da cultura do milho sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 931-938. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000500010>.
- Lange, A., Carvalho, J. L. N., Damin, V., Cruz, J. C. e Marques, J. J. (2006). Alterações em atributos do solo decorrentes da aplicação de nitrogênio e palha em sistema semeadura direta na cultura do milho. *Ciência Rural*, 36, 460-467. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000200016>.
- Malavolta, E., Vitti, G. C. e Oliveira, S.A. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2ª ed. Piracicaba: Potafos.
- Oliveira, J. M. S. e Caires, E. F. (2003). Adubação nitrogenada em cobertura para o milho cultivado após aveia preta no sistema plantio direto. *Acta Scientiarum*, 25, 351-357.
- Pauletti, V. (2004). Nutrientes: teores e interpretações. 2ª ed. Castro: Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária.
- Pavan, M. A., Bloch, M. F., Zempulski, H. C., Miyazawa, M. e Zocoler, D. C. (1992). Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná (Circular, 76).
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. e McMahon, T. A. (2007). Update world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Pereira, A. R., Angelocci, L. R. e Sentelhas, P. C. (2002). *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária.
- Pöttker, D. e Roman, E. S. (1994). Efeito de resíduos de culturas e do pousio de inverno sobre a resposta do milho a nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 29, 763-770.
- Queiroz, A. M., Souza, C. H. E., Machado, V. J., Laba, R. M. Q., Korndorfer, G. H. e Silva, A. A. (2011). Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea mays* L.). *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 10, 257-266. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v10n3p257-266>.
- Rajj, B. (2011). Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: IPNI Brasil.
- Rolim, G. S., Sentelhas, P. C. e Barbieri, V. (1998). Planilhas no ambiente EXCEL™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6, 133-137.
- Sangoi, L. e Almeida, M. L. (1994). Doses e épocas de aplicação de nitrogênio para a cultura do milho num solo com alto teor de matéria orgânica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 29, 13-24.
- Silva, D. R. G., Pereira, A. F., Dourado, R. L., Silva, F. P., Ávila, F. W. e Faquin, V. (2011). Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT-treated urea. *Ciência e Agrotecnologia*, 35, 516-523. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000300012>.
- Silva, P. S. L., Oliveira, F. H. T. e Silva, P. I. B. (2003). Efeitos da aplicação de doses de nitrogênio e densidades de plantio sobre os rendimentos de espigas verdes e de grãos de milho. *Horticultura Brasileira*, 21, 452-455. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362003000300007>.
- Soratto, R. P., Silva, A. H., Cardoso, S. M. e Mendonça, C. G. (2011). Doses e fontes alternativas de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo arenoso. *Ciência e Agrotecnologia*, 35, 62-70. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000100007>.
- Valderrama, M., Buzetti, S., Benett, C. G. S., Andreotti, M. e Minhoto, M. C. T. (2011). Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41, 254-263. <http://dx.doi.org/10.5216/pat.v41i2.8390>.
- Zhu, Z. L. e Chen, D. L. (2002). Nitrogen fertilizer use in China – Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 63, 117-127. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1021107026067>.