

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ALLISON JOSÉ FORNARI

ADUBAÇÃO NITROGENADA E POTÁSSICA NA CULTURA DO MILHO
EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO

PONTA GROSSA-PR
2014

ALLISON JOSÉ FORNARI

ADUBAÇÃO NITROGENADA E POTÁSSICA NA CULTURA DO MILHO
EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO

Dissertação apresentada para obtenção do
título de Mestre em Agronomia na
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Área de concentração – Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

PONTA GROSSA-PR
2014

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

F727 Fornari, Allison José
 Adubação nitrogenada e potássica na
 cultura do milho em sistema plantio direto
 de longa duração/ Allison José Fornari.
 Ponta Grossa, 2014.
 69f.

 Dissertação (Mestrado em Agronomia -
 Área de Concentração: Agricultura),
 Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero
 Caires.

 1.Zea mays L.. 2.Nitrogen. 3.Potassium.
 4.Extraction of nutrients. 5.Nutrient
 export. I.Caires, Eduardo Fávero. II.
 Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Mestrado em Agronomia. III. T.

CDD: 632



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “Adubação nitrogenada e potássica na cultura do milho em sistema plantio direto de longa duração”

Nome: Allison José Fornari

Orientador: Eduardo Fávero Caires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá

Prof. Dr. Gabriel Barth

Data da Realização: 31 de julho de 2014.

Dedico:

A minha esposa Maria Janeth, aos filhos João Paulo e Ana Livia,
a meus pais Clair e Jandira.

AGRADECIMENTOS

A DEUS por todas as maravilhas que tem acontecido em minha vida.

À minha família, de forma especial à minha esposa e filhos pelo tempo que lhes foi tomado durante as horas de estudo para a conclusão deste trabalho.

Ao Sr. Lucio Miranda pelo apoio, incentivo, confiança e disponibilidade em investir em minha capacitação técnica e profissional.

Ao professor Dr. Eduardo Fávero Caires, pela atenção, paciência, amizade e orientação no presente estudo.

Aos colegas de trabalho na Empresa Agropecuária Lucio Miranda, de forma especial ao Antônio Milkzuck pela amizade, apoio e incentivo;

Aos colegas e amigos do Laboratório de Fertilidade de Solos, Ângelo Bini, Adriano Haliski, Danilo Scharr, Gabriel Soares, Lucas Tzaskos, Shively Galletto pela ajuda na realização das análises e pela amizade.

A colaboradora Dirce Vaz do Laboratório de Fertilidade de solos pela amizade, paciência e ajuda na execução das tarefas.

Aos todos os colegas do curso de pós graduação, de forma especial aos amigos André Auler, Daniel Potma, Thays Schneider, Simone Miara, Vinícius Bodanese.

Aos colegas de trabalho da Fazenda Paiquerê, Mario Taques, Emerson Gonçalves, Adir Maciel, Mario Demejon e a todos os demais colegas pela ajuda na execução dos trabalhos de campo;

A Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), por possibilitar a realização do mestrado e ao Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, por auxiliar na realização das análises.

A todos os professores do curso de pós-graduação em agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa pelo ensino e amizade;

RESUMO

O nitrogênio (N) e o potássio (K) são os nutrientes exigidos em maiores quantidades pela cultura do milho, sendo necessárias quantidades adequadas de N e K nas fases de maior demanda da cultura. O presente trabalho teve o objetivo de avaliar os efeitos da adubação com N e K na nutrição, no desempenho e na produtividade da cultura do milho em sistema plantio direto de longa duração. O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com 530 g kg⁻¹ de argila, conduzido em sistema de plantio direto por 30 anos. A sequência de culturas adotada antes da instalação do experimento foi aveia/milho/trigo/soja/trigo/soja, com cultivo anual de aveia/milho em 33% da área e de trigo/soja em 67% da área. O delineamento experimental empregado foi em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas foram aplicados 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de K, além de um tratamento controle sem K. Nas subparcelas foram empregados 75, 150 e 225 kg ha⁻¹ de N, além de um tratamento controle sem N. As doses de K foram aplicadas na forma de KCl, a lanço em pré-semeadura, e as de N foram aplicadas na forma de ureia, em cobertura, quando as plantas de milho estavam no estádio V₄ (quatro folhas completamente expandidas). As relações Ca/K, Ca+Mg/K e $\sqrt{\text{Ca} + \text{Mg}}/\text{K}$ no solo (0–0,20 m) foram linearmente reduzidas com o aumento das doses de K aplicadas em pré-semeadura. Não houve efeito significativo do aumento das doses de K sobre as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu e Fe nas folhas de milho, na massa seca da parte aérea e nos grãos do milho. O incremento de doses de N aumentou os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn e Zn nas folhas de milho na fase de florescimento, aumentou a concentração de N e diminuiu os teores de P, K, Mn, Zn e Fe na matéria seca da parte aérea, e aumentou as concentrações de N, P, K, S, Mn, Zn e Fe nos grãos de milho. O incremento das doses de K aumentou a extração de K, enquanto as doses de N aumentaram a extração de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn e Cu pela parte aérea do milho. A exportação de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu e Fe não foi alterada pelas doses de K, porém aumentou com o incremento de doses de N aplicadas na cultura do milho. As doses de K aumentaram a altura das plantas e de inserção da espiga. O aumento das doses de N aumentou o diâmetro de colmo, a altura das plantas e de inserção da espiga, a produção de matéria seca da parte aérea, o número de grãos por fileira e por espiga, a massa da espiga e a massa de 1000 grãos. As doses de K não influenciaram significativamente a produtividade de grãos de milho, enquanto que o aumento das doses de N chegou a dobrar a produtividade de grãos do milho. A eficiência de utilização de N diminuiu com o incremento das doses de N aplicadas em cobertura e não melhorou com adubação potássica na cultura do milho. A produtividade relativa de grãos de milho esteve estreitamente relacionada com os teores foliares de N, P, Mg e S. A produtividade relativa de grãos de milho apresentou relações mais estreitas com os produtos N × P, N × K e N × S do que com as relações N/P, N/K e N/S no tecido foliar do milho. Os resultados sugerem que a alta demanda de N pelo milho cultivado após aveia preta no sistema plantio direto não aumenta a demanda de K na adubação do milho, em solo com teor suficiente de K trocável na camada de 0–0,20 m.

Palavras-Chave

Zea mays L; nitrogênio; potássio; extração de nutrientes; exportação de nutrientes; eficiência de utilização de nutrientes; relação N/K.

ABSTRACT

Nitrogen (N) and potassium (K) are nutrients required in larger amounts by corn, requiring adequate levels of N and K phases of higher demand culture. This study aimed to evaluate the effects of fertilization with N and K nutrition, performance and productivity of maize in long-term tillage system. The experiment was carried out on a Yellow Red Oxisol dystrophic with 530 g kg⁻¹ clay under no-till for 30 years. The sequence of crops adopted before the establishment of the experiment was oat/corn/wheat/soybean/wheat/soybean with the annual crop of oat/corn in 33% of the area and wheat/soybean in 67% of the area. A randomized complete block design was used, with three replications in a split-plot arrangement. The treatments consisted of applications of urea at 0, 75, 150, and 225 kg N ha⁻¹ to subplots within plots with KCl previously at 0, 100, 200, and 300 kg K ha⁻¹. The K rates were applied on the surface before seeding, and the N rates were applied in top dressing when corn plants were at the V₄ stage (four fully expanded leaves). The Ca/K, Ca + Mg/K, and $\sqrt{\text{Ca} + \text{Mg}}$ /K relationships in the topsoil (0-0.20 m) were linearly reduced with increasing rates of K applied pre-sowing. There was no significant effect of increasing K rates on concentrations of N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu and Fe in corn leaves, dry weight of shoots and grains of corn. The increase in N rates increased the contents of N, P, K, Ca, Mg, S, Mn and Zn in the leaves of corn at the silking stage, increased the concentration of N and decreased the content of P, K, Mn, Zn, and Fe in the aboveground part and increased the concentrations of N, P, K, S, Mn, Zn, and Fe in corn grains. The increasing rates of K increased the extraction of K, while the N rates increased the extraction of N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, and Cu by corn shoots. The export of N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu, and Fe was not affected by K rates, but increased with increasing rates of N applied in corn. Potassium fertilization increased plant height and ear height. Increasing N rates increased stem diameter, plant height and ear height, the dry matter production of shoots, the number of kernels per row and per spike, spike and the mass of the mass 1000 grains. Potassium rates did not significantly influence corn grain yield, while increasing rates of N reached double the corn yield. The N use efficiency decreased with increasing N rates in corn and has not improved with potassium fertilization. The relative grain yield of corn was closely related to foliar N, P, Mg and S. The relative grain yield of corn had closer relations with the products N × P, N × K, and N × S than with N/P, N/K, and S/N ratio in leaf tissue of corn. The results suggest that the high demand of N by corn grown after oat under no-till does not increase the demand for K fertilization in corn, in soil with sufficient content of exchangeable K in the 0-0.20 m layer.

Keywords

Zea mays L.; nitrogen; potassium; extraction of nutrients; nutrient export; efficiency of utilization of nutrients; N/K ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Cronologia de uso do solo na área experimental da Fazenda Paiquerê-----	25
Figura 2	Precipitação pluvial mensal e temperatura mínima e máxima do ar (médias mensais), registrada durante o período de desenvolvimento da cultura do milho, na safra 2012–2013. Precipitação histórica do período de 1986 a 2013. Dados coletados na Fazenda Paiquerê.----	27
Figura 3	Teor de potássio na matéria seca da parte aérea (MSPA) e nos grãos de milho na fase de maturação fisiológica em função da aplicação de K (a) e de N (b). ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ♦: teor de K na MSPA; ●: Teor de K nos grãos.-----	40
Figura 4	Desdobramento da interação entre N e K para a extração de P pela massa seca da parte aérea (MSPA) na fase de maturação fisiológica em função da aplicação de K (a) e de N (b). ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ♦: teor de K na MSPA; ●: Teor de K nos grãos.-----	45
Figura 5	Imagens dos tratamentos com doses de nitrogênio: (a): sem cobertura de N; (b): 75 kg ha ⁻¹ N; (c): 150 kg ha ⁻¹ e (d): 225 kg ha ⁻¹ ; (e): tamanho de espigas de milho em função de doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho em sistema de plantio direto.-----	57
Figura 6	Produtividade de grãos de milho de acordo com doses de nitrogênio (a) e potássio (b) aplicadas em cobertura em sistema de plantio direto. **: $P < 0,01$.-----	59
Figura 7	Produtividade relativa de milho em função dos teores foliares de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f). *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$.-----	60
Figura 8	Produtividade relativa de milho em função das relações N/P, N/K e N/S e dos produtos N x P, N x K e N x S nas folhas. **: $P < 0,01$.-----	61

LISTA DE TABELA

Tabela 1	Dados de produtividade e estimativa de aporte de resíduos adicionados sobre o solo pelas culturas de inverno e de verão cultivadas durante o período de nove anos na Fazenda Paiquerê.----	25
Tabela 2	Resultados de análises químicas do solo da área experimental, antes da instalação do experimento. -----	26
Tabela 3	Valores de F da análise de variância para os atributos químicos do solo na profundidade de 0-0,20 m.-----	32
Tabela 4	Valores de F da análise de variância para percentuais de cátions trocáveis (Ca, Mg e K) na CTC a pH 7,0 e relações catiônicas na profundidade de 0-0,20 m.-----	32
Tabela 5	Alterações dos atributos químicos do solo na profundidade de 0-0,20 m, após 6 meses da aplicação de nitrogênio e potássio na cultura do milho em sistema de plantio direto.-----	33
Tabela 6	Saturações de Ca, Mg, K e relações catiônicas do solo na profundidade de 0-0,20 m, após 6 meses da aplicação de nitrogênio e potássio na cultura do milho em sistema de plantio direto.-----	34
Tabela 7	Valores de F da análise de variância para diagnose do tecido foliar do milho-----	35
Tabela 8	Concentrações de nutrientes nas folhas do milho na fase de florescimento, em função da aplicação de doses de N e de K.-----	36
Tabela 9	Valores de F para concentração de nutrientes na massa seca da parte aérea do milho-----	39
Tabela 10	Concentração de nutrientes na massa seca da parte aérea em função da adubação com doses de nitrogênio e potássio no sistema de plantio direto-----	40
Tabela 11	Valores de F para concentração de nutrientes nos grãos de milho.---	41
Tabela 12	Concentração de nutrientes nos grãos do milho em função da aplicação de doses de nitrogênio e potássio em sistema de plantio direto.-----	42
Tabela 13	Valores de F para extração de nutrientes pelas plantas de milho.-----	43
Tabela 14	Extração de nutrientes pela parte aérea da cultura do milho em função da adubação com doses de nitrogênio e potássio no sistema plantio direto.-----	46

Tabela 15	Valores de F para exportação de nutrientes pelos grãos de milho.----	47
Tabela 16	Exportação de nutrientes pelos grãos de milho em função da adubação com doses de N e K.-----	48
Tabela 17	Valores de F para as eficiências de utilização de nitrogênio.-----	50
Tabela 18	Eficiências de aproveitamento de nitrogênio pela cultura do milho em função das doses de potássio aplicadas em pre-semeadura e de nitrogênio aplicadas em cobertura no sistema plantio direto.-----	50
Tabela 19	Valores de F para diâmetro do colmo, altura da planta e de inserção da espiga, e produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de milho.-----	52
Tabela 20	Diâmetro de colmo, altura da planta e de inserção da espiga, e produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho em função de doses de nitrogênio e potássio em sistema de plantio direto.-----	53
Tabela 21	Valores de F para o número fileiras de grãos por espiga (NFG), o número de grãos por fileira (NGF), o número de grãos por espiga (NGE), a massa da espiga (ME) e a massa de 1000 grãos (MMG) de milho.-----	54
Tabela 22	Número de fileiras de grãos por espiga (NFG), número de grãos por fileira (NGF), número de grãos por espiga (NGE), massa da espiga (ME) e massa de 1000 grãos (MMG) de milho em função de doses de nitrogênio e potássio em sistema plantio direto.-----	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Nitrogênio (N)	14
2.1.1	Importância do nitrogênio para as plantas	14
2.1.2	Formas de entrada de nitrogênio no solo	14
2.1.3	Dinâmica do nitrogênio no solo	14
2.1.4	Respostas do milho ao nitrogênio	17
2.2	Potássio (K)	19
2.2.1	Importância do potássio para as plantas	19
2.2.2	Formas de entrada de potássio no solo	20
2.2.3	Dinâmica do potássio no solo	20
2.2.4	Respostas do milho ao potássio	22
2.3	Relação N/K	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Descrição do local, do solo e do manejo	25
3.2	Rotação de culturas	26
3.3	Instalação da cultura do milho	26
3.4	Condições climáticas	27
3.5	Delineamento experimental e tratamentos	27
3.6	Avaliação de atributos da planta de milho	28
3.6.1	Altura de inserção da espiga	28
3.6.2	Altura de plantas	28
3.6.3	Diâmetro de colmo	28
3.6.4	Número de grãos por espiga	28
3.6.5	Massa média de espigas	28
3.6.6	Massa de 1000 grãos	28
3.6.7	Produtividade de grãos	28

3.7	Diagnose foliar do milho-----	29
3.8	Extração e exportação de nutrientes pelo milho-----	29
3.9	Amostragem e análises químicas do solo-----	30
3.10	Cálculos da eficiência de utilização de nutrientes-----	30
3.12	Análises estatísticas-----	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	32
4.1.	Alterações químicas do solo-----	32
4.2	Diagnose foliar no florescimento do milho-----	35
4.3	Concentração de nutrientes nas plantas de milho na fase de maturação fisiológica-----	39
4.4	Extração de nutrientes pelas plantas de milho-----	42
4.5	Exportação de nutrientes pelos grãos do milho-----	46
4.6	Eficiências de utilização de nitrogênio-----	49
4.7	Alterações nos atributos da planta-----	52
4.8	Produtividade de grãos de milho-----	56
4.9	Relações entre os teores foliares de nutrientes e a produtividade relativa do milho-----	59
4.10	Produtividade relativa em função das relações N/P, N/K, N/S e produtos N x P, N x K e N x S-----	59
5	CONCLUSÕES-----	62
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	63

1 INTRODUÇÃO

O milho tem se destacado na cadeia produtiva nacional como um dos principais componentes de rações de aves, suínos e bovinos. Além disso, a cultura desempenha um importante papel no sistema de rotação de culturas no sistema de plantio direto. A área cultivada com milho no Brasil, na safra de 2012–2013, foi de 15,8 milhões de hectares, sendo desse total, 6,8 milhões de hectares na primeira safra e 9,0 milhões de hectares na segunda safra ou safrinha (CONAB, 2014).

A produção brasileira de milho, na safra de 2012–2013, foi de 34,9 e 46,2 milhões de toneladas de grãos na primeira e na segunda safra, respectivamente, totalizando uma oferta de 81 milhões de toneladas de grãos (CONAB, 2014). Entretanto, a produtividade média nacional de grãos de milho, de 5.120 kg ha^{-1} , encontra-se muito abaixo da produtividade alcançada por produtores que utilizam tecnologia mais avançada, os quais chegam a obter mais de $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$. Isso mostra que é possível alcançar altas produtividades de grãos de milho com a melhoria das estratégias de manejo da cultura.

Uma das estratégias que pode ser melhorada para a obtenção de altas produtividades na cultura do milho é o fornecimento de nutrientes em quantidades equilibradas e suficientes para atender as necessidades fisiológicas durante todo o ciclo da cultura.

O nitrogênio (N) e o potássio (K) são os nutrientes extraídos em maiores quantidades pela cultura do milho, sendo necessários cerca de 190 kg N ha^{-1} e 196 kg K ha^{-1} para produtividade média de 9100 kg ha^{-1} de grãos (BÜLL, 1993). Em trabalhos mais recentes, Von Pinho et al. (2009) obtiveram extrações da ordem de 327 kg N ha^{-1} e de 316 kg K ha^{-1} para produtividade de 14600 kg ha^{-1} de grãos, em dois híbridos de milho cultivados em sistema de plantio direto. As quantidades exportadas pela colheita dos grãos de milho são diferentes para esses dois nutrientes, considerando que a exportação de N é de cerca de 75% do total extraído, enquanto que a de K varia de 20 a 30% (COELHO et al., 2006).

A resposta das culturas à adubação depende dos níveis de cada nutriente presente no solo. Assim, quando os nutrientes estão em níveis baixos no solo, as culturas tendem a apresentar respostas mais acentuadas à sua aplicação.

Como a maior parte do N do solo encontra-se na forma orgânica, tem sido muito difícil realizar previsão das doses de N a serem aplicadas na adubação por meio da análise química do solo. Porque as respostas das culturas à aplicação de N normalmente são muito variáveis em função dos teores de matéria orgânica do solo,

a definição das doses de N tem sido feita de acordo com informações sobre o histórico da área, a sucessão ou rotação de culturas, a espécie cultivada, as condições climáticas (temperatura e precipitação pluvial) e a produtividade esperada.

No caso do K, Fontoura et al. (2011) encontraram teores críticos de $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K trocável para as culturas de aveia branca, trigo e cevada, e de $0,16 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K trocável, para as culturas de soja e milho, na camada diagnóstica de 0–0,20 m. Para a situação em que o sistema de produção envolve o cultivo das culturas de inverno (aveia branca, trigo e cevada) e de verão (milho e soja), foi sugerido adotar o maior valor de nível crítico ($0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

A hipótese deste trabalho é de que a cultura do milho apresenta resposta diferenciada à aplicação de N e K, e que há uma relação ideal de N e K na qual a cultura do milho apresenta maior resposta em produtividade. O presente trabalho teve o objetivo de avaliar os efeitos da adubação com doses de N e K na nutrição, no desempenho e na produtividade de grãos de milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Nitrogênio (N)

2.1.1 Importância do nitrogênio para as plantas

O N participa de diversos compostos como os aminoácidos, proteínas, bases nitrogenadas, ácidos nucleicos, enzimas e coenzimas, além de alguns pigmentos e produtos secundários, atuando em vários processos como a fotossíntese, respiração, sínteses em geral e multiplicação e diferenciação celular (MALAVOLTA, 2006). Os principais sintomas de deficiência de N observados nas plantas são caracterizados pela diminuição sensível do crescimento da parte aérea e na formação de folhas e flores, e amarelecimento generalizado dos tecidos clorofilados (FAÇANHA et al., 2004).

2.1.2 Formas de entrada de nitrogênio no solo

As principais formas de entradas de N no solo são através da fixação biológica de N por microrganismos do solo, pela aplicação de fertilizantes nitrogenados e pela incorporação do N elementar em óxidos por meio das descargas atmosféricas (RAIJ, 1991).

Alves et al. (2006), trabalhando com o balanço de N no sistema de plantio direto, observaram que a fixação simbiótica de N representou 83% do total de N acumulado pela cultura da soja, representando o fornecimento de 193 kg ha^{-1} de N.

Cantarella (2007) afirma que as perdas de N podem ser elevadas quando os fertilizantes nitrogenados são utilizados em quantidades excessivas ou em condições desfavoráveis, tornando-se poluente de águas superficiais ou subterrâneas e da atmosfera.

2.1.3 Dinâmica do nitrogênio no solo

O maior estoque de N no solo é a matéria orgânica, representando mais de 95% do N total do solo (CANTARELLA, 2010). O N orgânico do solo pode ser disponibilizado para as plantas por meio do processo de mineralização. A mineralização é definida como a transformação do N da forma orgânica para a forma inorgânica, sendo realizada por um grupo variado de microrganismos heterotróficos do solo que utiliza os compostos orgânicos como fonte de energia (CANTARELLA, 2007; LOPES, 2004).

O processo de imobilização ocorre simultaneamente com a mineralização, sendo resultante da transformação do N inorgânico em N orgânico, através de

microrganismos que incorporam o N inorgânico disponível no solo às suas células (CANTARELLA, 2007).

Fontoura e Bayer (2009b) reportaram uma relação direta entre a quantidade de N absorvida pelo milho e o teor de matéria orgânica do solo, quando o milho foi avaliado na ausência de resíduos vegetais.

De acordo com Sá et al. (2007), a adição de resíduos com elevada relação C/N, superior a 30:1, tais como as palhas de aveia preta, milheto e milho, antes do plantio de uma cultura, possibilitará o consumo de N pela biomassa microbiana do solo, imobilizando na sua massa celular, podendo causar deficiência de N na cultura em desenvolvimento.

A disponibilidade de N no solo para as plantas é controlada pela adubação nitrogenada e pela decomposição da matéria orgânica, sendo a relação C/N das plantas de cobertura fator determinante da velocidade de decomposição, mineralização e a ciclagem de N (PAVINATO et al., 2008).

Amado et al. (2000) avaliaram a disponibilidade de N com o cultivo de plantas de cobertura no sistema plantio direto ao longo de 9 anos e observaram que a absorção de N pelo milho foi 32% menor quando cultivado após cobertura de aveia, com relação C/N de 45, comparativamente ao milho cultivado após cobertura de ervilhaca, com relação C/N de 14.

O acúmulo de resíduos na superfície do solo favorece o aumento da atividade biológica, intensificando as reações de mineralização e as transformações do N-amoniacoal (SÁ, 1993).

Siqueira Neto et al. (2010) avaliaram as alterações das quantidades de N-total e inorgânico do solo e as taxas de mineralização e desnitrificação de N do solo em um Latossolo argiloso cultivado em sistema de plantio direto de 12 e 22 anos, e observaram aumentos nos teores de N-total do solo de 1,64 g ha⁻¹ para 2,48 g kg⁻¹ para os períodos de cultivo em plantio direto de 12 e 22 anos, respectivamente. As maiores taxas de mineralização líquida foram encontradas na camada até 0,025 m de profundidade, com valores de 0,19 e 0,26 g m⁻² dia⁻¹ e taxa de nitrificação de 0,18 e 0,29 g m⁻² dia⁻¹, para o tempo de plantio direto de 12 e 22 anos, respectivamente.

De acordo com Lopes et al. (2004), como resultado das transformações do N no solo, o N está sujeito a perdas por lixiviação, volatilização e desnitrificação.

A lixiviação é o processo de migração de nutrientes, na forma de complexos ou pares iônicos, para profundidades abaixo da zona de crescimento radicular. O ânion NO₃⁻ encontra-se predominantemente na solução do solo, estando sujeito a

perdas por lixiviação, quando o volume de precipitação pluvial exceder a capacidade de retenção de água no solo (BAYER e FONTOURA, 2009).

A lixiviação de NO_3^- no solo compromete as necessidades das plantas de milho no estágio de florescimento e enchimento de grãos (MAI et al., 2003). De acordo com Silva et al. (2005), a maior adsorção de NO_3^- pelo subsolo, em profundidades ainda exploradas pelas raízes das culturas, contribui para o maior aproveitamento do N e para a redução da lixiviação do NO_3^- .

Aita et al. (2004), trabalhando com plantas de cobertura em um Argissolo Vermelho distrófico textura franco-arenosa, observaram maior potencial de perdas de N mineral por lixiviação após o cultivo de ervilhaca do que após cultivo de aveia e nabo forrageiro.

Fernandes e Libardi (2009) avaliaram a lixiviação do NO_3^- em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico arenoso sob plantio direto e constataram que a lixiviação de NO_3^- no solo foi de 0,50, 0,56, 26,41 e 39,81 kg N ha⁻¹ com a aplicação de 0, 60, 80 e 120 kg N ha⁻¹, respectivamente, quando a precipitação pluvial foi de 439 mm no período de avaliação.

A volatilização é o resultado de perdas de N na forma NH_3 (amônia), resultante da reação de NH_4^+ com OH^- no solo. As perdas podem ocorrer das reações de solubilização dos fertilizantes nitrogenados, amoniacais ou amídicos e são dependentes da umidade e do tipo de solo, da fonte de N e da forma de aplicação do fertilizante, em superfície ou com incorporação no solo (BAYER e FONTOURA, 2009).

Costa et al. (2003), avaliando as perdas de N por volatilização de N- NH_3 em cana de açúcar com palha na superfície do solo, obtiveram perdas da ordem de 36% quando foi aplicada ureia a lanço.

Lara Cabezas e Souza (2008) obtiveram perdas de N- NH_3 por volatilização da ordem de 77% e 8% para as fontes de N de ureia e sulfato de amônio, respectivamente, quando aplicados em cobertura na cultura do milho conduzida em plantio direto. Neste mesmo trabalho, Lara Cabezas e Souza (2008) observaram que a mistura da ureia com sulfato de amônio farelado e granulado promoveu redução das perdas de N- NH_3 por volatilização para níveis de 28% e 38%, respectivamente.

Rojas et al. (2012) observaram que as perdas de N- NH_3 em sistema de plantio direto aumentaram em função do aumento das doses de N aplicadas em superfície na cultura do milho. Entretanto, os valores obtidos foram de 7,5% para a dose de 100 kg N ha⁻¹ e de 8,5% para a dose de 200 kg N ha⁻¹. Os autores ressaltam que ocorreu precipitação pluvial acumulada de 73 mm nos primeiros 6

dias após a aplicação da ureia em cobertura, o que deve ter contribuído para minimizar as perdas por volatilização.

Lopes et al. (2004) recomendam a utilização de técnicas de manejo da adubação nitrogenada que minimizem possíveis perdas de N-NH_3 por volatilização, principalmente quando do emprego de ureia como fonte nitrogenada em cobertura e sem incorporação.

De acordo com Wrage et al. (2004), a desnitrificação é o processo no qual as bactérias nitrificadoras reduzem o NO_3^- a N_2 ou N_2O em condições de menor aeração. Os autores encontraram maior produção de N_2O em solo mais úmido, com textura argilosa, e com maior dose de N aplicada.

2.1.4 Respostas do milho ao nitrogênio

As respostas da cultura do milho à aplicação de N são diferenciadas em função da relação C/N da cultura de cobertura. Assim, após o cultivo de gramíneas, o milho absorveu, em média, 15 kg ha^{-1} de N a menos do que após pousio; já quando cultivado após o consórcio gramínea/leguminosa ou nabo forrageiro e leguminosa solteira, a absorção de N pelo milho foi 40 e 90 kg ha^{-1} maior, respectivamente (FONTOURA e BAYER, 2009).

Ferreira et al. (2009) trabalhando com níveis de palha de aveia para cobertura do solo e doses crescentes de N aplicadas em cobertura na cultura do milho, observaram aumento na produtividade de grãos, no teor de N foliar e redução na altura de requeima das folhas em função do aumento das doses de N.

Silva et al. (2006b) observaram que o milho teve menor aproveitamento do N proveniente do fertilizante quando houve incremento das doses aplicadas em cobertura.

Araujo et al. (2004) verificaram que o milho respondeu linearmente em produtividade de grãos quando da aplicação de doses crescentes de N, tendo-se obtido maior produtividade com a aplicação de 240 kg ha^{-1} de N, a qual foi 28% superior em relação ao tratamento controle sem N.

Fontoura e Bayer (2009) obtiveram rendimentos de milho na faixa de 12,1 a 14 t ha^{-1} com a aplicação de 200 kg N ha^{-1} , no entanto, a resposta à adubação nitrogenada não foi linear, evidenciando que a aplicação de doses mais elevadas proporcionou redução na eficiência de utilização do N pelas plantas de milho.

De acordo com Santos et al. (2013), a produtividade do milho em sistema de plantio direto foi influenciada pela aplicação de doses de N, sendo obtida a máxima produtividade, de $14,5 \text{ t ha}^{-1}$ de grãos, com a dose de 316 kg ha^{-1} de N.

Silva et al. (2005) observaram maior número de fileiras de grãos por espiga de milho e maior número de grãos por fileira com a aplicação de doses crescentes de N, obtendo-se máxima eficiência técnica e econômica com as doses de 162 e 154 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Para a massa de 1000 grãos, a resposta às doses de N foi linear. No caso da produtividade de grãos, a máxima eficiência técnica e a econômica ocorreram, respectivamente, com as doses de 166 kg ha⁻¹ e 126 kg ha⁻¹ de N.

Ferreira et al. (2001) encontraram efeitos positivos para as características de massa de espigas, massa de 1000 grãos e número de espigas de milho por planta em função do incremento das doses de N. A máxima produtividade de grãos foi alcançada com a dose de 201 kg N ha⁻¹.

De acordo com Ferreira et al. (2001), o efeito das doses de N sobre a massa de 1000 grãos pode ter sido devido ao maior período efetivo de enchimento de grãos, tendo-se observado que aos 120 dias após a emergência, o tratamentos com as maiores doses de N ainda possuíam maiores quantidades de folhas verdes, prolongando a translocação de açúcares para os grãos.

Liu e Wiatrak (2012), trabalhando com doses de N variando de 0 a 180 kg ha⁻¹, observaram aumento de 9% na altura das plantas de milho.

Para Gomes et al. (2007), o incremento de doses de N aumentou o teor foliar de N, a altura das plantas e o rendimento de grãos de milho. Porém, não foi observado efeito sobre a massa média das espigas e a massa de 1000 grãos.

A massa de grãos por espiga e a produtividade de grãos de milho foram influenciadas de forma linear com o incremento de doses de N, obtendo-se aumento de 0,071 g e 4,96 kg de milho por kg de N aplicado, respectivamente (DEPARIS et al., 2007).

Leal et al. (2013), trabalhando com doses de N na cultura do milho, observaram que houve aumento na concentração de N e P nas folhas em função das doses, porém não observaram alterações nos teores foliares de K, Ca e Mg.

De acordo com Deparis et al. (2007), o teor foliar de N foi afetado negativamente pelo incremento de doses de N, devido ao efeito diluição do nutriente nos tecidos, causado pela maior produção de massa seca das plantas de milho. Já, os teores foliares e nos grãos de P e K não foram afetados pela aplicação de N em cobertura na cultura do milho.

De forma semelhante, Silva et al. (2006b) encontraram ajuste quadrático para os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg e S em função do incremento de doses de N na cultura do milho.

Santos et al. (2013) observaram efeito linear de doses de N sobre o teor de N foliar em plantas de milho, obtendo-se valores de 25,1 g kg⁻¹ na menor dose e 30,1 g kg⁻¹ na maior dose de N aplicada.

Ferreira et al. (2001) observaram aumento nas concentrações de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu e Mn com o incremento de doses de N na cultura do milho. A maior concentração de P, K, Mg e Zn ocorreu com a dose de 198 kg N ha⁻¹, enquanto que para Ca foi de 167 kg ha⁻¹.

Duete et al. (2009) obtiveram teores de N nos grãos de milho entre 13,7 e 17,5 g kg⁻¹, sendo as quantidades acumuladas nos grãos do milho da ordem de 100 a 130 kg ha⁻¹, ressaltando a necessidade de enfatizar práticas de manejo do solo, planta e de fertilizantes nitrogenados para aportar quantidades adequadas de N para o milho, proporcionando a manutenção do estoque do nutriente e a produtividade da cultura em longo prazo. De acordo com os autores, o melhor aproveitamento do N pelos grãos de milho ocorreu com a adubação nitrogenada até o estágio V₈ (oito folhas completamente expandidas).

A quantidade total de N acumulada pelas plantas de milho aumentou com o incremento de doses de N, sendo da ordem de 2/3, 16,6 g kg⁻¹ acumulada nos grãos, e 1/3, 8,7 g kg⁻¹ na palha (SILVA et al., 2006c).

Goes et al. (2013), avaliando o efeito de doses de N na cultura do milho, obtiveram efeito significativo sobre os teores de N nos grãos e nas folhas, sendo os teores médios de 17,3 g kg⁻¹ e 24,9 g kg⁻¹, respectivamente.

2.2 Potássio (K)

2.2.1 Importância do potássio para as plantas

Nas plantas, o K é o cátion mais abundante e está envolvido em muitos processos fisiológicos, tais como aproveitamento de água, fotossíntese, transporte de assimilados e ativação enzimática (PETTIGREW, 2008), síntese de proteínas e como um cátion contador para o acúmulo de ânions e processos de transporte eletrogênico (AMTMANN et al., 2006).

De acordo com Mengel e Arneke 1982 citados por Pettigrew (2008), o K é importante na manutenção do potencial de água das plantas, na manutenção do turgor e na promoção da elongação celular das folhas.

A deficiência de K reduz o tamanho dos internódios, a dominância apical e o crescimento das plantas, retarda a frutificação e origina sementes de menor tamanho. Os sintomas de deficiência de K são caracterizados por clorose nas bordas das folhas mais velhas, seguido por necrose (ERNANI et al., 2007).

O K não faz parte de nenhum componente estrutural das plantas, sendo encontrado predominantemente na forma iônica de K^+ nos tecidos (PETTIGREW, 2008). Por esse motivo, o K retorna rapidamente ao solo após a senescência das plantas (PAVINATO et al., 2008).

De acordo com Kaminski et al. (2007), as plantas possuem capacidade de absorver K do solo acima da necessidade metabólica, sendo os teores de K na matéria seca das plantas sempre mais altos com o emprego de doses mais elevadas de K.

2.2.2 Formas de entrada de potássio no solo

O K do solo provém do intemperismo de minerais primários e secundários que contém o elemento na sua estrutura (ERNANI et al., 2007). Nos solos tropicais, o K pode ser encontrado na forma estrutural e na forma não-trocável.

Nos solos brasileiros, os feldspatos potássicos, micas, vermiculitas e as esmectitas são os principais minerais ligados à presença e à disponibilidade de K. O K presente nos minerais primários não está prontamente disponível para as plantas, precisando de reações de dissolução dos minerais primários para a liberação do K da estrutura do mineral (CURI et al., 2005).

De acordo com Ernani et al. (2007), a aplicação de fertilizantes potássicos aumenta a concentração do nutriente na solução do solo e com isso, os teores de K trocável em profundidade, estabelecendo-se novos equilíbrios entre os cátions. Com isso, parte do K passa a ocupar algumas cargas elétricas negativas dos constituintes do solo.

O emprego de fertilizações potássicas no sistema de produção no longo prazo tem demonstrado que o retorno dos resíduos culturais e a fertilização balanceada de K poderiam manter a produtividade das culturas e a qualidade do solo (BELAY et al., 2002).

2.2.3 Dinâmica do potássio no solo

O K no solo encontra-se em equilíbrio entre as formas de K não-trocável, K trocável e K em solução. A passagem do K trocável para a solução é rápida, enquanto que a saída do K da forma não-trocável para trocável é mais lenta e depende da concentração de K na solução (CURI et al., 2005).

A fração trocável de K está adsorvida eletrostaticamente às cargas negativas na superfície das partículas do solo e frações orgânicas (ERNANI et al., 2007), podendo ser substituído por outros cátions da solução do solo.

A dinâmica de K solo é afetada pela reciclagem do nutriente através do cultivo das plantas comerciais e de cobertura do solo, sendo os principais efeitos na dinâmica do K, a presença da planta e seus resíduos sobre o solo, a atividade radicular (agregação e ciclagem de nutrientes) e a relação agregação-acúmulo de matéria orgânica do solo, resultando no aumento da CTC do solo, a qual altera a dinâmica de cátions do solo, entre eles o K (FONTOURA e BAYER, 2009).

Neves et al. (2009) trabalhando com incrementos de doses de K, observaram que a distância percorrida pelo K não se correlacionou com nenhum atributo do solo (pH, matéria orgânica, CTC efetiva e CTC-pH7,0, teor de K trocável inicial do solo, teor de água e teores de areia, silte e argila).

As perdas de K no solo ocorrem principalmente por lixiviação, sendo dependente da concentração de K na solução do solo e o excesso de água que desloca para camadas mais profundas carregando o K da solução. As perdas por erosão ou por escoamento superficial são importantes em solos com limitada capacidade de infiltração de água (MIELNICZUK, 2005).

Para Werle et al. (2008), as perdas de K por lixiviação podem ser aumentadas de acordo com o manejo das adubações, considerando a aplicação em pré-semeadura coincidindo com a ausência de cultivo e elevados índices pluviométricos.

Com relação à textura do solo, Werle et al. (2008) observaram maior intensidade de lixiviação de K em solo com textura média; já no solo argiloso a intensidade tende a ser mais constante, ou seja, apesar das maiores quantidades de K percolado, esse tipo de solo possui maior capacidade de retenção de K.

O K é um nutriente bastante móvel no solo e a sua absorção é seletiva, sendo afetada pela concentração do nutriente na solução do solo e pelo transporte deste para a superfície radicular (CHEN e GABELMAN, 2000).

A difusão é o principal mecanismo de fluxo de K da solução do solo para as raízes e ocorre em razão de um gradiente de concentração entre a superfície da raiz (menor concentração) e o restante da solução do solo (maior concentração) (WIETHÖLTER, 2007).

O fluxo de massa é o principal mecanismo de mobilidade vertical descendente dos nutrientes devido à atuação de forças gravitacionais, sendo influenciado pela concentração na solução do solo e pelo volume de água que percola no perfil. No entanto, a mobilidade pode ser dificultada pelas sucessivas atrações que o nutriente é submetido pelas cargas negativas ou por grupos funcionais dos compostos sólidos (ERNANI et al., 2007).

2.2.4 Respostas do milho ao potássio

Quando os teores de K trocável no solo são maiores ou iguais a $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (níveis considerados altos), a cultura do milho não responde em produtividade à adubação potássica (EMBRAPA, 2012). Nesse caso, deve-se fazer adubação de manutenção, aplicando-se somente a quantidade de K que foi exportada pelos grãos de milho.

Brunetto et al. (2005) verificaram que as culturas comerciais e as plantas de cobertura apresentaram baixa resposta à adubação potássica, atribuindo esse efeito à liberação de K não-trocável dos minerais micáceos e feldspatóides presentes no solo. Nesse estudo, o nível crítico de K trocável no solo foi de $0,11 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o qual respondeu por 90% da produção relativa das culturas.

Estudando o nível crítico de K trocável no solo, Wendling et al. (2008) encontraram o teor de $0,19 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, no qual o rendimento relativo das culturas de soja, milho e trigo foi de 90%. As culturas de soja, milho e trigo não apresentaram respostas positivas em produtividade à aplicação de K quando os teores no solo estavam no nível considerado alto. O trigo não respondeu à aplicação de K mesmo quando deixou-se de aplicar o nutriente por duas safras consecutivas, quando o teor no solo estava acima do nível crítico.

Deparis et al. (2007), trabalhando com doses de K na cultura do milho em solo com teores de K de $0,37$ e $0,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para as profundidades $0-0,10$ e $0,10-0,20$ m, respectivamente, não observaram efeito significativo da adubação potássica na massa de grãos por espiga e na produtividade de grãos de milho.

A adição de K no solo resultou em colmos mais grossos e maior altura de plantas, observados em todas as fases de desenvolvimento da cultura do milho, porém a produtividade de grãos não foi influenciada quando os teores de K no solo estavam acima de $0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (ANDREOTTI et al, 2001).

Para a cultura do milho, Wendling et al. (2008) obtiveram aumento no rendimento de $11,7 \text{ kg}$ de grãos para cada kg de K_2O aplicado, em solos com teor de K abaixo do nível crítico de $0,19 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Schlindwein et al. (2011) obtiveram respostas positivas à aplicação de K com aumentos de $4,3$, $15,6$ e $40,2 \text{ kg}$ de grãos para cada kg de K_2O adicionado ao solo para as culturas da soja, trigo e milho, respectivamente. Para Brunetto et al. (2005), o rendimento de grãos foi de $17,7 \text{ kg}$ de grãos de milho para cada kg de K_2O aplicado em um Argissolo sob plantio direto.

A taxa de acúmulo de K foi de $10,6 \text{ kg t}^{-1}$ de massa seca da parte aérea e $4,4 \text{ kg t}^{-1}$ de grãos produzidos, sendo que a taxa de exportação de K nos grãos pode variar de 26 a 43% do total absorvido pelas plantas de milho (COELHO, 2005).

2.3 Relação N/K

A interação entre N e K é do tipo não-competitiva, de forma que a absorção de um elemento eleva a demanda pelo outro, de certa forma, o estímulo do crescimento provocado pela adição de N pode levar à deficiência de K por efeito de diluição, sendo o inverso verdadeiro. O suprimento de N e K em quantidades balanceadas, frequentemente aumenta a resposta a ambos, mas a adição de um deles em solos deficientes pode levar a uma menor resposta ao outro tanto em produção quanto em acúmulo do nutriente (CANTARELA, 2007)

Segundo Zhang et al. (2010), a relação N/K está relacionada ao estado dos nutrientes no solo, às práticas de cultivo, às espécies de plantas cultivadas e ao nível de produtividade. Quando o teor de K trocável no solo está abaixo do nível crítico, a adubação nitrogenada é menos eficiente e as perdas de N tornam-se muito maiores.

Segundo Viana e Kiehl (2010), o N e o K disponíveis no solo em proporções adequadas são importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Isso porque o metabolismo do N nas plantas requer adequadas quantidades de K no citoplasma das células, sendo importante para a produção de aminoácidos e a produtividade das culturas (XU et al., 2010 citados por VIANA e KIEHL, 2010).

Em trabalho conduzido para testar doses de N e K na cultura do trigo, Viana e Kiehl (2010) observaram que o acúmulo de N e K na parte aérea variou somente em função da adição das doses, não havendo interação entre as doses de N e K.

Lavres Jr e Monteiro (2003) avaliando os efeitos de combinações de doses de N e de K em solução nutritiva, observaram interação significativa de níveis de N e de K na produção da área foliar total, comprimento radicular total e superfície radicular total do capim mombaça, destacando o papel do N como principal modulador do crescimento radicular.

Andrade et al. (2000), avaliando a produção de MS de capim elefante cv. Napier em função da aplicação de doses crescente N e K, observaram aumento de 85,6 % na produção de MS quando utilizaram as doses mais elevadas, 340 e 304 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente, destacando a importância de ambos os nutrientes para o rendimento forrageiro da cultura.

Para a obtenção de altas produtividades de milho em regiões que utilizam alta tecnologia, doses cada vez maiores de N têm sido empregadas na adubação. Considerando a importância do equilíbrio de N e K para o crescimento e desenvolvimento das plantas, maior atenção deve-se ter com relação à adubação potássica. Apesar das lacunas existentes na literatura a respeito desse assunto para

a cultura do milho, é possível que o maior aporte de N na adubação visando à obtenção de tetos mais altos de produtividade de milho demande a aplicação de doses mais elevadas de K (VIANA e KIEHL, 2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do local, do solo e do manejo

O experimento foi realizado na Fazenda Paiquerê, município de Piraí do Sul (PR), cujas coordenadas geográficas são 24° 21' 18" de latitude Sul e 51° 06' 10" de longitude oeste, e altitude de 945 m. O solo utilizado no estudo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distroférico (EMBRAPA, 2009), com 530, 238 e 232 g kg⁻¹ de argila, silte e areia na profundidade de 0-0,20 m. Na figura 01 encontra-se a descrição da cronologia de utilização do solo da área experimental.

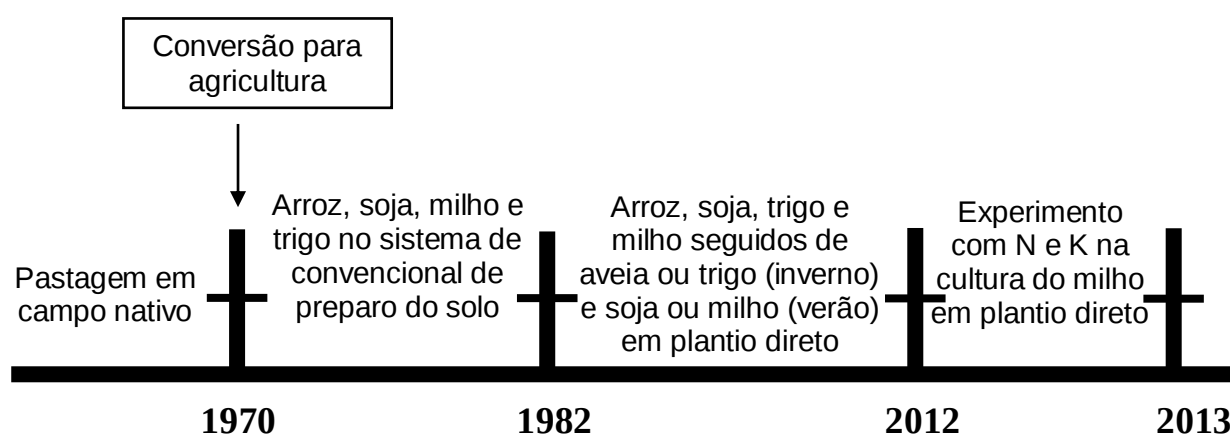


Figura 1 – Cronologia de uso da área experimental na Fazenda Paiquerê.

Na tabela 1 encontra-se a sequência histórica de culturas implantadas na área de condução do experimento no período de 9 anos, as produtividades obtidas e a estimativa de aporte de resíduos adicionados sobre o solo.

Tabela 1 – Dados de produtividade e estimativa de aporte de resíduos adicionados sobre o solo pelas culturas de inverno e de verão cultivadas durante o período de 9 anos na Fazenda Paiquerê.

Ano	Cultura		Produtividade		Aporte de Resíduos	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
-----kg ha ⁻¹ -----						
2004	Aveia	Milho	(1)	8207	-	7816
2005	Trigo	Soja	3430	3680	3267	3505
2006	Aveia	Soja	(1)	3535	-	3367
2007	Trigo	Soja	2742	3416	2611	3253
2008	Trigo	Soja	3453	3123	3289	2974
2009	Aveia	Milho	(1)	10730	-	10219
2010	Trigo	Soja	4250	4247	4048	4045
2011	Trigo	Soja	3799	3662	3618	3488
2012	Aveia	Milho	(1)	9201	-	8763

(1) Dados não registrados – cultura utilizada para cobertura do solo.

As correções do solo, anteriores à instalação do experimento, foram realizadas com frequência de três anos. Em abril de 2009 foram aplicados 3000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico e 1500 kg ha⁻¹ de gesso agrícola na superfície, conforme as recomendações técnicas realizadas por meio da interpretação dos resultados de análises de solo.

Os resultados das análises químicas do solo da área experimental, realizadas no mês de março de 2012, antes da instalação do experimento, estão apresentados da Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados de análises químicas e físicas do solo da área experimental, antes da instalação do experimento.

Profundidade (m)	pH ⁽¹⁾	H+Al	Al	Ca	Mg	K	CTC ⁽²⁾	P ⁽³⁾	C	V ⁽⁴⁾
		-----		cmol _c dm ⁻³		-----		mg dm ⁻³	g dm ⁻³	%
0-0,20	4,5	10,45	0,95	4,70	0,75	0,31	16,21	3,5	29	35,5

⁽¹⁾ pH em CaCl₂; ⁽²⁾ CTC a pH 7,0; ⁽³⁾ Extrator Mehlich-1; ⁽⁴⁾ Saturação por bases do solo.

Em abril de 2012, visando elevar a saturação de bases do solo a 60%, foram aplicados na superfície do solo, 4 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 86%, 31% de CaO e 21% de MgO, e PN = 107%) e 3 t ha⁻¹ de gesso agrícola (14% de S e 17% de Ca).

3.2 Rotação de culturas

A sequência de culturas utilizadas antes da instalação do experimento foi aveia/milho (2009-2010), trigo/soja (2010-2011) e trigo/soja (2011-2012), representando o cultivo anual de aveia/milho em 33% da área e trigo/soja em 67% da área. Na safra 2012-2013, a aveia preta foi cultivada no período de outono-inverno para produção de cobertura do solo e, na sequência, cultivou-se o milho que foi a cultura estudada nesse experimento.

3.3 Instalação da cultura do milho

O milho foi semeado após cultivo de aveia preta, a qual foi manejada 65 dias antes da semeadura do milho. A cultura da aveia preta foi adubada com 120 kg ha⁻¹ de MAP (11-52-00), visando o fornecimento de 13,2 kg ha⁻¹ de N e 62,4 kg ha⁻¹ de P₂O₅. A semeadura do milho, híbrido STATUS VIPTERA[®], foi realizada no início de outubro de 2012, na densidade de 76000 sementes por hectare e espaçamento de 0,5 m entre as linhas, de modo a obter 70000 plantas por hectare. As sementes de

milho foram tratadas com 50 g ha⁻¹ de imidacloprid e 10 g ha⁻¹ de carbendazin + 21 g ha⁻¹ de thiram. A adubação de semeadura foi efetuada por meio da aplicação de 250 kg ha⁻¹ da fórmula 18–23–00 (N–P₂O₅–K₂O), visando o fornecimento de 45 kg ha⁻¹ de N e 57,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅. O controle fitossanitário foi realizado conforme as necessidades da cultura do milho, de modo a permitir o adequado desenvolvimento das plantas.

3.4 Condições climáticas

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb (IAPAR, 1994), com verões frescos e geadas frequentes e severas durante o inverno, sem estação seca definida.

Os dados médios mensais de precipitação pluvial, temperaturas máximas e mínimas registradas durante o período de condução da cultura do milho, na safra 2012–2013, estão apresentados na Figura 2.

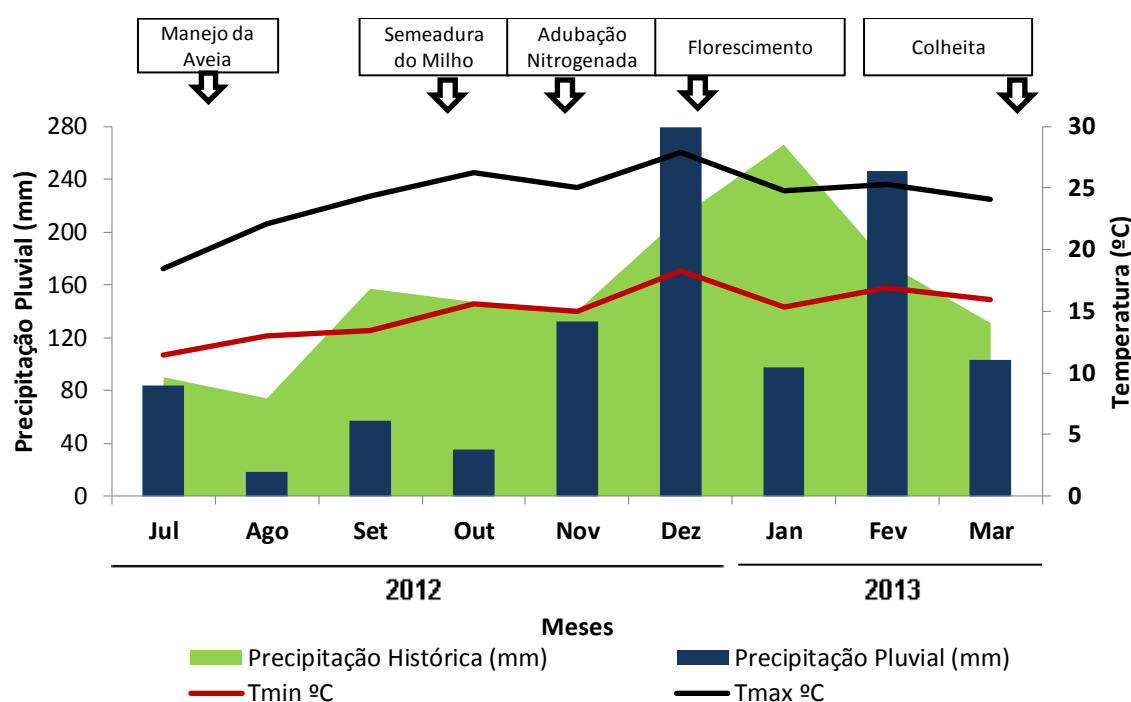


Figura 2 – Precipitação pluvial mensal e temperatura mínima e máxima do ar (médias mensais), registrada durante o período de desenvolvimento da cultura do milho, na safra 2012–2013. Precipitação histórica do período de 1986 a 2013. Dados coletados na Fazenda Paiquerê.

3.5 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas e as subparcelas tinham, respectivamente, 182 m² (26,0 m × 7,0 m) e 45,5 m² (6,5 m × 7,0 m). Nas parcelas, aplicaram-se três doses de K (100, 200 e 300 kg ha⁻¹), na forma de cloreto de potássio, além de um tratamento controle sem K. Nas

subparcelas, empregaram-se três doses de N em cobertura (75, 150 e 225 kg ha⁻¹), na forma de ureia, além de um tratamento controle sem N. As doses de K foram aplicadas a lanço antes da semeadura do milho e a aplicação de N em cobertura foi realizada quando as plantas de milho estavam no estágio V₄, com quatro folhas completamente expandidas.

3.6 Avaliações de atributos da planta de milho

3.6.1 Altura de inserção da espiga

A avaliação de altura de inserção da espiga foi feita na maturação fisiológica por meio de medidas com régua graduada da base da planta até a base da espiga, em 10 plantas de cada subparcela.

3.6.2 Altura das plantas

A avaliação de altura das plantas foi realizada na maturação fisiológica por meio de medidas com régua graduada realizada da base da planta até o nó da última folha (folha bandeira), em 10 plantas de cada subparcela.

3.6.3 Diâmetro de colmo

A avaliação de diâmetro do colmo foi realizada na maturação fisiológica por meio de paquímetro, medindo-se o diâmetro médio do colmo das plantas na altura do terceiro nó, em 10 plantas de cada subparcela.

3.6.4 Número de grãos por espiga

A avaliação do número de grãos por espiga foi realizada pela contagem do número de fileiras e do número de grãos por fileira em 10 espigas colhidas de cada subparcela.

3.6.5 Massa média de espigas

A massa média das espigas foi avaliada pela pesagem individual de 10 espigas colhidas de cada subparcela. O resultado da pesagem foi corrigido para 130 g kg⁻¹ de umidade.

3.6.6 Massa de 1000 grãos

A massa 1000 grãos foi avaliada pela contagem e posterior pesagem de 250 grãos de milho em cada subparcela, extrapolando-se o valor para 1000 grãos.

3.6.7 Produtividade de grãos

A produtividade de grãos foi avaliada após a maturação fisiológica, por meio de colheita manual das espigas de milho das 4 linhas centrais com 5 m de comprimento, perfazendo uma área útil de 10 m² de cada subparcela. Após a colheita, as espigas foram debulhadas, utilizando-se debulhadora motorizada estacionária. A produtividade e a umidade dos grãos em cada subparcela foram determinadas, corrigindo-se o teor de umidade nos grãos para 130 g kg⁻¹.

3.7 Diagnose foliar do milho

Por ocasião do florescimento do milho, amostras de folhas foram coletadas retirando-se o terço médio das folhas abaixo e oposta à espiga em 30 plantas de cada subparcela. As amostras de folhas foram lavadas com água deionizada após a retirada da nervura central. Em seguida, as folhas coletadas foram colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60°C por 72 h, até atingir massa constante. Depois disso, as amostras de folhas foram moídas em moinho tipo “Wiley”, equipado com peneira de 0,85 mm e acondicionadas em recipientes plásticos. Os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn e Fe foram determinados segundo os métodos descritos em Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Os teores foliares de N foram determinados por meio da digestão sulfúrica e leitura pelo método semi-micro-Kjeldahl. As concentrações de P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn e Fe foram determinados por digestão nítrico-perclórica e leitura por colorimetria do metavanadato para P, fotometria de emissão de chama para K, turbidimetria do sulfato de bário para S e espectrofotometria de absorção atômica para Ca, Mg, Mn, Cu, Zn e Fe.

3.8 Extração e exportação de nutrientes pelo milho

Por ocasião da maturação fisiológica, foram coletadas cinco plantas de cada subparcela, somente a parte aérea, para avaliação da extração de nutrientes. As plantas coletadas foram lavadas, separadas em folhas, colmos, espigas e grãos, e colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60°C por 72 h, até atingir massa constante. Depois disso, foi avaliada a produção de matéria seca das amostras de cada parte da planta e, posteriormente, as amostras foram moídas em moinho tipo “Wiley”, equipado com peneira de 0,85 mm, e acondicionadas em recipientes plásticos. Os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn e Fe foram determinados segundo os métodos descritos em Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Os teores foliares de N foram determinados por meio da digestão

sulfúrica e leitura pelo método semi-micro-Kjeldahl. As concentrações de P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn e Fe foram determinados por digestão nítrico-perclórica e leitura por colorimetria do metavanadato para P, fotometria de emissão de chama para K, turbidimetria do sulfato de bário para S e espectrofotometria de absorção atômica para Ca, Mg, Mn, Cu, Zn e Fe. A extração de nutrientes, em cada parte da planta (folhas, colmos, sabugos e grãos) foi calculada pelo produto dos resultados de produção de matéria seca e de teores de nutrientes. A extração de nutrientes pela parte aérea das plantas foi calculada pela soma das extrações de cada parte da planta (folhas, colmos, sabugos e grãos).

3.9 Amostragem e análises químicas do solo

Após a colheita do milho, foram coletadas amostras de solo, em cada parcela, na profundidade de 0–0,20 m, por meio de trado holandês. Foram coletadas 12 subamostras por subparcela para constituir uma amostra composta. Nessas amostras, foram determinados o pH em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , a acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$), a acidez trocável (Al) e os teores de Ca, Mg, K, P e C-orgânico, conforme os métodos descritos em Pavan et al. (1992).

3.10 Cálculos da eficiência de utilização de nitrogênio

As seguintes eficiências de utilização de N foram calculadas de acordo com Fageria (1998), considerando as doses de N aplicadas em cobertura para cada dose de K aplicada em pré-semeadura:

3.10.1 Eficiência agrônômica (EA, kg kg^{-1})

$$(\text{EA}, \text{kg kg}^{-1}) = \frac{\text{Produção de grãos (kg) com N} - \text{Produção de grãos (kg) sem N}}{\text{Dose de N aplicada (kg)}}$$

3.10.2 Eficiência fisiológica (EF, kg kg^{-1})

$$(\text{EF}, \text{kg kg}^{-1}) = \frac{\text{Produção de MSPA (kg) com N} - \text{Produção de MSPA (kg) sem N}}{\text{N acumulado na MSPA (kg) com N} - \text{N acumulado na MSPA (kg) sem N}}$$

onde, MSPA é a massa seca da parte aérea do milho

3.10.3 Eficiência agrofisiológica (EAF, kg kg^{-1})

$$(\text{EAF}, \text{kg kg}^{-1}) = \frac{\text{Produção de grãos (kg) com N} - \text{Produção de grãos (kg) sem N}}{\text{N acumulado na MSPA (kg) com N} - \text{N acumulado na MSPA (kg) sem N}}$$

3.10.4 Eficiência na recuperação aparente (ERA, kg kg^{-1})

$$(\text{ERA}, \text{kg kg}^{-1}) = \frac{\text{N acumulado na MSPA (kg) com N} - \text{N acumulado na MSPA (kg) sem N}}{\text{Dose de N aplicada (kg)}}$$

3.10.5 Fator parcial de produtividade do N (FPPN, kg kg⁻¹)

$$(\text{FPP, kg kg}^{-1}) = \frac{\text{Produção de grãos (kg) com N}}{\text{Dose de N aplicada (kg)}}$$

3.10.6 Eficiência de utilização do N (EUN, kg kg⁻¹)

$$(\text{EUN, kg kg}^{-1}) = EF \times ERA$$

3.11 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos às análises de variância e de regressão, utilizando-se o software estatístico ASSISTAT 7.7. Na ausência de interação significativa entre as doses de N e as de K, os efeitos das doses de N e K foram comparados por análises de regressão, pelas médias das observações. No caso de interação significativa entre as doses de N e de K, realizou-se o devido desdobramento por regressão. O critério para a escolha do modelo foi a magnitude dos coeficientes de determinação das regressões significativas ao nível de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Alterações químicas do solo

Os valores de F da análise de variância para atributos químicos do solo estão apresentados na Tabela 3. Não houve efeito significativo das doses de K aplicadas para os atributos químicos avaliados no solo. Para as doses de N, observou-se efeito significativo pelo teste F ($P < 0,05$) somente para o teor de Ca. A interação N $\times$ K também influenciou significativamente ($P < 0,05$) pelo teste F apenas o teor de Ca.

Tabela 3 - Valores de F da análise de variância para atributos químicos do solo na profundidade de 0-0,20 m.

Causa da variação	pH (CaCl ₂)	P (Mehlich-1)	C	Ca	Mg	K	CTC (pH 7,0)
Potássio (K)	0,41 ns	0,45 ns	2,39 ns	0,39 ns	0,27 ns	3,62 ns	2,76 ns
Nitrogênio (N)	1,72 ns	0,46 ns	0,62 ns	3,12 *	0,32 ns	1,41 ns	1,41 ns
N $\times$ K	0,98 ns	1,07 ns	0,77 ns	2,38 *	0,93 ns	1,34 ns	1,02 ns
CV % (K)	6,9	49,2	3,8	15,5	44,7	24,8	4,5
CV % (N)	2,2	31,8	3,7	5,4	21,9	13,9	3,7

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; CV%: coeficiente de variação.

As doses de K influenciaram significativamente ($P < 0,05$) as relações Ca/K, (Ca+Mg)/K e $\sqrt{(Ca + Mg)}/K$. As doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho afetaram a saturação de Ca na CTC a pH 7,0 do solo (Ca%) ($P < 0,01$) e as relações Ca/K, (Ca + Mg)/K e $\sqrt{(Ca + Mg)}/K$ ($P < 0,05$). Não houve efeito significativo da interação entre as doses de N e K sobre as saturações de Ca, Mg e K na CTC a pH 7,0 do solo e para as relações Ca/Mg, Ca/K, Mg/K, (Ca+Mg)/K e $\sqrt{(Ca + Mg)}/K$ (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de F da análise de variância para percentuais de cátions trocáveis (Ca, Mg e K) na CTC a pH 7,0 e relações catiônicas na profundidade de 0-0,20 m.

Causa da variação	% Ca	% Mg	% K	$\frac{Ca}{Mg}$	$\frac{Ca}{K}$	$\frac{Mg}{K}$	$\frac{Ca + Mg}{K}$	$\frac{\sqrt{Ca + Mg}}{K}$
Potássio (K)	0,15 ns	0,39 ns	3,61 ns	0,68 ns	7,39 *	2,18 ns	6,7 *	7,27 *
Nitrogênio (N)	5,19 **	0,46 ns	1,97 ns	0,93 ns	3,13 *	2,08 ns	3,57 *	3,38 *
N $\times$ K	1,88 ns	0,95 ns	1,47 ns	0,36 ns	1,57 ns	1,89 ns	1,99 ns	1,88 ns
CV % (K)	15,6	45,3	26,4	39,4	20,8	36,8	21,5	10,2
CV % (N)	5,4	12,3	14,1	26,4	13,2	20,5	12,4	6,2

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; CV%: coeficiente de variação.

Apesar de o teste F ter revelado influência significativa das doses de N e da interação N × K sobre o teor de Ca trocável (Tabela 3), as análises de regressão do desdobramento não mostraram efeito significativo da aplicação de N e K sobre o teor de Ca trocável no solo (Tabela 5).

O teor de K trocável do solo aumentou de forma linear em função do incremento das doses de K aplicadas em pré-semeadura (Tabela 5). Houve aumento no teor de K no solo de 0,09 cmol_c dm⁻³ no tratamento controle (Tabela 5) em relação à análise realizada antes da instalação do experimento (Tabela 2). Esse aumento deve ter sido decorrente da ciclagem de K pela cultura de aveia cultivada para a produção de cobertura antes da semeadura do milho.

Tabela 5 – Alterações de atributos químicos do solo na profundidade de 0-0,20 m, após 6 meses da aplicação de nitrogênio e potássio na cultura do milho em sistema de plantio direto.

planta direto.								
Doses	pH (CaCl ₂)	P (Mehlich-1) ¹	C	Al	Ca	Mg	K	CTC ² (pH 7,0)
kg ha ⁻¹		g dm ⁻³	g dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----				
Potássio								
0	4,8	4,7	30,8	0,14	6,8	1,1	0,40	16,3
100	4,9	4,2	30,2	0,11	6,5	1,2	0,44	15,5
200	4,9	4,2	29,6	0,10	6,6	1,1	0,54	15,8
300	4,8	3,8	30,6	0,13	6,4	1,0	0,51	15,7
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	L**	ns
R ²	-	-	-	-	-	-	0,76	-
CV %	6,9	49,2	3,8	6,8	15,5	44,7	24,8	4,5
Nitrogênio ³								
0	4,9	4,1	30,1	0,12	6,7	1,1	0,50	15,5
75	4,9	4,5	30,1	0,10	6,7	1,1	0,44	15,9
150	4,9	3,9	30,7	0,15	6,3	1,1	0,47	15,9
225	4,8	4,3	30,3	0,12	6,7	1,0	0,47	15,9
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
R ²	-	-	-	-	-	-	-	-
CV %	2,2	31,8	3,7	5,2	5,4	21,9	13,9	3,8

¹ Fósforo extraído com solução de Mehlich-1 (HCl 0,05 N + H₂SO₄ 0,025 N); ² Capacidade de troca de cations do solo; ns: não significativo; **: P < 0,01; L: efeito linear por análise de regressão; ³ Doses de N aplicadas em cobertura no estádio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

As doses de K aumentaram de forma linear a saturação de K na CTC a pH 7,0 do solo e proporcionaram efeito linear negativo nas relações Ca/K, (Ca+Mg)/K e $\sqrt{(Ca + Mg)} / K$ no solo (Tabela 6). Esse efeito sobre as relações no solo, deve-se ao aumento do teor de K no solo pelo incremento das doses de K aplicadas e à manutenção dos teores de Ca e Mg. Os valores do R² (coeficiente de determinação)

foram de 0,89, 0,90 e 0,91 para as relações Ca/K, (Ca+Mg)/K e $\sqrt{(Ca + Mg)}/K$, respectivamente. As doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho não influenciaram significativamente os percentuais de cátions na CTC a pH 7,0 e as relações catiônicas.

De acordo com Fageria (2001), valores de relações catiônicas de Ca/K entre 11,2 e 18,4, Ca/Mg entre 2,0 e 2,7 e Mg/K entre 5,8 e 6,7 não interferem na produtividade das culturas do arroz, feijão, milho e soja.

Rosolem et al (1984) observaram efeitos negativos na produção da cultura do sorgo sacarino quando as relações Ca/K estavam menores que 7,4 e Mg/K menor que 0,6 devido à menor absorção de Ca e Mg, enquanto que a relação Ca/Mg não influenciou a produção.

Tabela 6 – Saturações de Ca, Mg, K na CTC a pH 7,0 e relações catiônicas do solo na profundidade de 0-0,20 m, após 6 meses da aplicação de nitrogênio e potássio na cultura do milho em sistema de plantio direto.

Doses	% Ca	% Mg	% K	$\frac{Ca}{Mg}$	$\frac{Ca}{K}$	$\frac{Mg}{K}$	$\frac{Ca + Mg}{K}$	$\frac{\sqrt{Ca + Mg}}{K}$
kg ha ⁻¹	-----%-----			-----cmol _c dm ⁻³ -----				
Potássio								
0	41,8	6,3	2,4	7,1	17,5	2,6	20,1	4,5
100	42,0	7,4	2,9	5,9	15,6	2,7	18,3	4,3
200	41,9	7,1	3,4	6,0	12,6	2,1	14,7	3,8
300	40,6	6,4	3,2	7,0	12,7	1,9	14,6	3,8
Efeito	ns	ns	L**	ns	L*	ns	L**	L**
R ²	-	-	0,78	-	0,89	-	0,90	0,91
CV (%)	15,2	45,3	26,4	39,4	15,5	36,1	21,5	7,5
Nitrogênio ¹								
0	42,9	6,9	3,2	6,2	13,9	2,3	16,1	3,9
75	42,1	6,9	2,8	6,4	15,9	2,6	18,6	4,3
150	39,5	6,9	2,9	6,2	13,9	2,4	16,3	4,0
225	41,8	6,4	2,9	7,2	14,5	2,2	16,7	4,0
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
R ²	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	5,9	12,3	14,1	26,4	15,5	20,5	12,4	6,2

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; L: efeito linear por análise de regressão; ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estádio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

Medeiros et al (2008) afirmam que relações de Ca/Mg de até 8,1 tiveram pouco efeito no desempenho de plantas de milho.

As saturações de Ca, Mg e K em relação à CTC pH 7,0 não foram afetadas pelas doses de N e K aplicados no solo. Os valores médios em relação à CTC a pH

7,0 do solo foram de 42%, 7% e 3% para Ca, Mg e K, respectivamente. Entretanto, considerando a CTC efetiva do solo, os valores médios de Ca, Mg e K foram, respectivamente, de 80%, 13% e 6%. Embora esse assunto seja bastante controverso, os valores baseados na CTC efetiva estão próximos do intervalo considerado ideal para o solo, conforme Albrecht 1975 citado por Kopittke e Menzies (2007), que considera o balanço de nutrientes catiônicos no solo de 60 a 75% de Ca, 10 a 20% de Mg e 2 a 5% de K ideal para o adequado desenvolvimento das plantas.

4.2 Diagnóstico foliar no florescimento do milho

As doses de K aplicadas não exerceram influência significativa nos teores foliares de nutrientes do milho. Houve efeito significativo ($P < 0,01$) das doses de N nos teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn e Zn. Os teores de nutrientes nas folhas do milho não foram influenciados de forma significativa pela interação N $\times$ K (Tabela 8).

Tabela 7 - Valores de F da análise de variância para diagnóstico do tecido foliar do milho.

Causa da variação	N	P	K	Ca	Mg
Potássio (K)	0,88 ns	0,20 ns	0,35 ns	4,09 ns	2,58 ns
Nitrogênio (N)	71,7**	34,55**	3,67*	7,27 **	28,53 **
N $\times$ K	0,19 ns	0,52 ns	1,33 ns	0,75 ns	0,85 ns
CV % (K)	8,9	15,9	11,6	17,9	21,7
CV % (N)	10,2	11,9	11,2	16,8	16,9

(Continuação)

Causa da variação	S	Mn	Zn	Cu	Fe
Potássio (K)	0,51 ns	1,47 ns	1,60 ns	0,04 ns	1,90 ns
Nitrogênio (N)	7,60 **	7,94 **	18,89 **	1,53 ns	2,47 ns
N $\times$ K	0,65 ns	1,12 ns	0,99 ns	0,72 ns	0,83 ns
CV % (K)	29,6	19,9	17,9	89,8	29,0
CV % (N)	18,1	11,7	12,6	98,9	23,3

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; CV%: coeficiente de variação.

Os teores de nutrientes nas folhas de milho não foram alterados com as doses de K aplicadas (Tabela 8). As concentrações de N nas folhas do milho ($\hat{y}$, em g kg^{-1}) aumentaram de forma quadrática ($P < 0,01$) em resposta às doses de N (x , em kg ha^{-1}) aplicadas em cobertura ($\hat{y} = 16,68 + 0,1254x - 0,0003x^2$). De acordo com a equação de regressão ajustada, a dose de 209 kg ha^{-1} de N em cobertura seria a responsável pela máxima concentração de N foliar, de 30 g kg^{-1} , bem como as doses de N menores que 145 kg ha^{-1} resultariam em teores de N abaixo do limite crítico, de 28 g kg^{-1} , estabelecido por Malavolta (2006) para a cultura do milho.

Gomes et al. (2007), trabalhando com doses e épocas de aplicação de N, obtiveram teores foliares de 28,9 e 31,4 g kg⁻¹ de N no milho para os tratamentos sem N e com 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Nascimento et al. (2012) avaliando o efeito de doses de N na aveia e no milho, observaram aumento linear no teor de N nas folhas do milho em função do aumento das doses de N, sendo que os valores adequados para a cultura do milho foram alcançados a partir da dose de 70 kg ha⁻¹.

Os teores de P nas folhas do milho aumentaram conforme o modelo quadrático ($P < 0,01$) em função das doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 8). No tratamento sem N, a concentração de P foi de 3,6 g kg⁻¹, estando dentro da faixa considerada adequada para a cultura do milho, enquanto que a aplicação de 75 kg ha⁻¹ de N já foi suficiente para elevar a concentração de P para 5,4 g kg⁻¹, valor acima do intervalo considerado ideal (2,5 a 4,0 g kg⁻¹) para a cultura do milho (MALAVOLTA, 2006).

Tabela 8 – Concentração de nutrientes nas folhas do milho na fase de florescimento, em função da aplicação de doses de N e K.

Doses	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Zn	Cu	Fe
kg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----			
Potássio										
0	25,1	5,1	34,8	3,2	1,7	1,6	37,8	23,9	37,5	98,1
100	23,8	5,2	36,5	3,2	1,7	1,7	36,1	21,9	38,1	95,2
200	24,4	5,1	35,9	2,9	1,5	1,8	42,0	24,5	37,6	117,9
300	24,9	4,9	35,8	2,7	1,4	1,9	36,7	21,5	41,8	92,0
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
R ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV %	8,9	15,9	11,6	16,1	35,8	31,9	20,0	17,9	89,9	29,0
Nitrogênio ¹										
0	15,9	3,6	32,8	2,4	1,0	1,4	33,3	17,6	34,2	85,3
75	24,6	5,4	35,7	3,1	1,5	1,7	37,8	23,9	22,8	102,3
150	27,7	5,7	38,1	3,3	2,2	1,9	39,7	24,8	42,9	106,9
225	29,9	5,7	36,5	3,1	1,6	2,0	41,8	25,5	55,1	108,7
Efeito	Q**	Q**	Q*	Q**	Q**	L**	L**	Q**	ns	ns
R ²	0,99	0,98	0,96	0,99	0,85	0,93	0,95	0,97	-	-
CV %	10,2	11,9	11,2	20,9	39,9	21,6	11,8	12,6	98,9	23,3

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; L e Q: efeito linear e quadrático por análise de regressão; CV%: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação. ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estágio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

As doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho proporcionaram resposta quadrática ($P < 0,01$) no teor de K nas folhas de milho (Tabela 8). Nota-se que o teor foliar de K, de 32,8 g kg⁻¹, obtido sem a aplicação de N em cobertura,

esteve acima da faixa considerada adequada (17 a 30 g kg⁻¹), estabelecida por Malavolta (2006). Isto demonstra que houve consumo de luxo pela cultura do milho para o teor de K no solo acima do limite crítico.

Ferreira et al. (2001) também obtiveram ajuste quadrático de doses de N sobre a concentração foliar de K na cultura do milho, com a maior concentração de K sendo alcançada com a dose de 195 kg ha⁻¹ de N.

Nascimento et al. (2012) obtiveram aumento linear do teor de K nas folhas do milho, apresentando o maior valor quando foi aplicado 20 kg ha⁻¹ de N na aveia e mais 120 kg ha⁻¹ no milho. Porém quando aplicado 60 kg ha⁻¹ na aveia, observou-se ajuste quadrático, obtendo o valor máximo de K nas folhas, 29,23 g kg⁻¹, com a dose de 86 kg ha⁻¹ aplicada na cultura do milho.

As concentrações foliares de Ca aumentaram ($P < 0,01$) em função do incremento das doses de N, de acordo com o modelo quadrático (Tabela 8). A máxima concentração de Ca nas folhas foi alcançada com uma dose próxima de 150 kg ha⁻¹ de N em cobertura. Os teores de Ca encontrados nas folhas de milho estão dentro da faixa considerada adequada (2,1 a 5,0 g kg⁻¹) para a cultura do milho (MALAVOLTA, 2006).

As doses de N aumentaram significativamente as concentrações de Mg nas folhas do milho, sendo a resposta quadrática (Tabela 8). Os teores de Mg encontrados nas folhas estiveram abaixo ou muito próximo do mínimo da faixa considerada adequada (2,1 e 4,0 g kg⁻¹) para a cultura do milho (MALAVOLTA, 2006). As baixas concentrações de Mg nas folhas do milho podem ser devido à competição entre o K e o Mg do solo pelos sítios de absorção nas raízes, causada pelos elevados teores de K no solo. Destaca-se que houve acentuada absorção de K pelas plantas de milho, pois os teores de K nas folhas estiveram acima da faixa considerada adequada para a cultura.

As concentrações de S nas folhas do milho aumentaram linearmente ($P < 0,01$) em função do incremento das doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 8). Os teores foliares obtidos estão dentro da faixa de 1,0 a 2,4 g kg⁻¹, considerada adequada para a cultura do milho (MALAVOLTA, 2006).

Nascimento et al. (2012) obtiveram ajuste quadrático para o teor de S nas folhas do milho em função das doses de N aplicadas na aveia e no milho, sendo os valores máximos obtidos com a aplicação de 40 e 101 kg ha⁻¹ de N na aveia e no milho, respectivamente.

Lara Cabezas e Souza (2008) trabalhando com fontes de nitrogênio e enxofre e relações N/S na adubação, não encontraram efeito significativo sobre os teores foliares de enxofre, obtendo teor foliar médio de $2,2 \text{ g kg}^{-1}$.

De acordo com Alvarez et al. (2007) o enxofre participa da composição de substâncias que conferem qualidade dos produtos e atua na síntese dos aminoácidos essenciais, cistina, cisteína e metionina, que são a base das proteínas. Desta forma, a aplicação de doses mais elevadas de N no sistema de produção requer o aumento das doses de S para o adequado metabolismo do N e para a síntese de proteínas.

As concentrações micronutrientes nas folhas do milho tiveram comportamentos diferenciados em resposta às doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho (Tabela 8). O teor foliar de Mn aumentou de forma linear, variando de $33,3 \text{ g kg}^{-1}$ no tratamento controle, sem N, até $41,8 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose de 225 kg ha^{-1} de N. Os valores dos teores foliares de Mn obtidos estão dentro da faixa adequada de 21 a 150 mg kg^{-1} para a cultura do milho (MALAVOLTA, 2006).

Para Nascimento et al. (2012) o teor de Mn nas folhas do milho aumentou de forma quadrática para a aplicação de doses de N no milho, obtendo valor máximo de 65 mg kg^{-1} de Mn quando aplicado $99,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N.

O teor foliar de Zn aumentou conforme o modelo quadrático, porém no tratamento controle, sem N, o teor foliar foi de $17,6 \text{ mg kg}^{-1}$, ficando pouco abaixo da faixa adequada de 20 a 40 mg kg^{-1} , conforme Malavolta (2006). Com a aplicação da dose de 75 kg ha^{-1} de N, já foi suficiente para elevar o teor foliar de Zn para $23,9 \text{ mg kg}^{-1}$, alcançando o nível adequado para a cultura do milho.

Os teores foliares de Cu e Fe não foram significativamente afetados pelo aumento das doses de N. Os teores médios obtidos para Cu estão acima da faixa adequada de 6 a 20 mg kg^{-1} , enquanto que os teores de Fe estão dentro da faixa de 21 a 250 mg kg^{-1} estabelecida por Malavolta (2006) como adequada para a cultura do milho.

O teor de Cu aumentou de forma linear ao incremento das doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho, sendo o maior teor, $12,7 \text{ mg kg}^{-1}$, obtido com a aplicação de 120 kg ha^{-1} de N (NASCIMENTO et al., 2012).

Nascimento et al. (2012) observaram que o teor foliar de Fe diminuiu linearmente com o aumento das doses de N aplicadas no milho.

Dentre os fatores que afetam a disponibilidade dos micronutrientes para as plantas, o pH do solo é o que atua na atividade das formas iônicas dos micronutrientes que são preferencialmente absorvidas pelas plantas (ABREU et al.,

2007). De acordo com Malavolta (2006), a adição de $N-NH_4$ aumenta o teor foliar de Fe, Mn e Zn nas folhas de citrus e de outras espécies.

O aumento nos teores foliares de Mn e Zn em função do aumento das doses de N, pode ser devido à acidificação superficial do solo causada pelo aumento das doses de N aplicadas em cobertura, aumentando a disponibilidade de Mn e Zn para as plantas do milho.

4.3 Concentração de nutrientes nas plantas de milho na fase de maturação fisiológica

Os valores de F para a concentração de nutrientes na massa seca da parte aérea (MSPA) do milho estão apresentados na Tabela 9. As doses de K interferiram significativamente nas concentrações de Ca e Mn, enquanto as doses de N exerceram influência significativa nas concentrações de N, P, K, Mg, Mn e Zn, na MSPA do milho. Os teores de nutrientes na MSPA do milho não foram influenciados significativamente pela interação $N \times K$.

Tabela 9 – Valores de F para concentração de nutrientes na massa seca da parte aérea do milho.

Causa da variação	N	P	K	Ca	Mg
Potássio (K)	0,75 ns	3,61 ns	3,60 ns	4,78 *	2,73 ns
Nitrogênio (N)	35,93 **	7,87 **	9,23 **	0,44 ns	3,11 *
$N \times K$	1,01 ns	1,92 ns	0,71 ns	0,49 ns	0,83 ns
CV % (K)	10,9	9,8	19,1	7,9	14,8
CV % (N)	12,1	11,2	15,4	8,2	11,8
(Continuação)					
Causa da variação	S	Mn	Zn	Cu	Fe
Potássio (K)	0,99 ns	5,82 *	2,45 ns	2,51 ns	1,70 ns
Nitrogênio (N)	1,33 ns	9,35 **	9,48 **	1,85 ns	2,12 ns
$N \times K$	1,42 ns	2,02 ns	1,56 ns	1,26 ns	1,48 ns
CV % (K)	16,9	8,4	10,1	52,8	28,5
CV % (N)	8,8	14,7	9,8	52,9	35,9

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; CV%: coeficiente de variação.

As doses de K aplicadas no milho aumentaram a concentração de K na MSPA. Conforme o modelo quadrático ajustado, a concentração máxima seria obtida com a dose de 216 kg K ha^{-1} . Entretanto, a concentração de K nos grãos não foi alterada com as doses de K aplicadas na cultura do milho (Figura 3a).

O teor de K na MSPA do milho na fase de maturação fisiológica diminuiu com o aumento das doses de N, enquanto que o teor de K nos grãos aumentou, ambos ajustando-se ao modelo linear (Figura 3b). Isto pode estar relacionado com a função desempenhada do K no transporte de açúcares e assimilados para os grãos,

de forma que o aumento das doses de N deve ter proporcionado maior acúmulo de reservas nos grãos, aumentando a demanda de K para o enchimento dos grãos que deve ter sido suprida pela translocação das reservas de K acumuladas na MSPA (colmos e folhas).

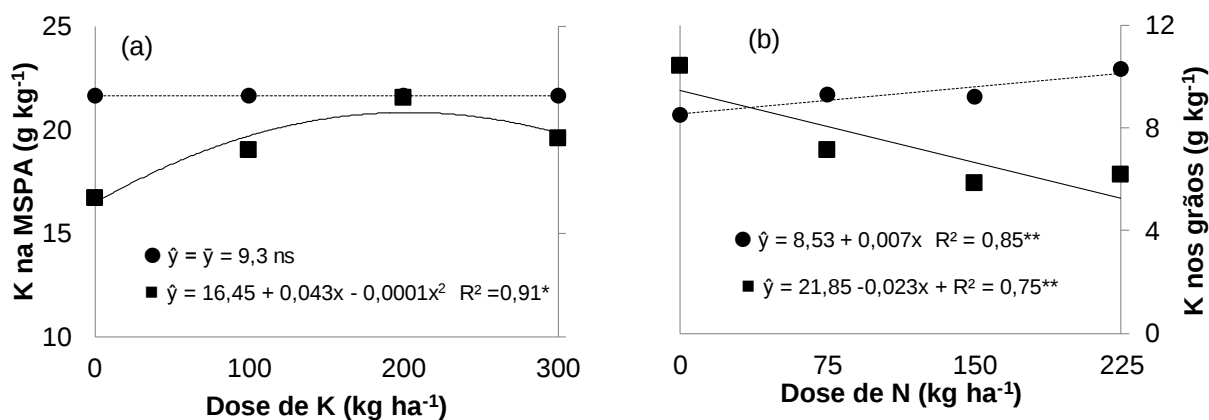


Figura 3 - Teor de potássio na matéria seca da parte aérea (MSPA) e nos grãos de milho na fase de maturação fisiológica em função da aplicação de K (a) e de N em cobertura (b). ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ■: teor de K na MSPA; ●: Teor de K nos grãos.

Tabela 10 – Concentração de nutrientes na massa seca da parte aérea do milho em função da adubação com doses de nitrogênio e potássio no sistema plantio direto.

Doses	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Zn	Cu	Fe
kg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
Potássio										
0	7,8	4,3	16,7	1,7	1,4	0,8	16,1	19,4	5,8	108,5
100	7,8	4,0	19,0	1,6	1,4	0,8	16,2	19,3	3,4	105,1
200	8,1	4,2	21,6	1,6	1,3	0,7	15,5	18,4	6,3	89,7
300	7,6	3,8	19,6	1,6	1,2	0,8	17,7	17,6	5,7	116,5
Efeito	ns	ns	Q*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
R ²	-	-	0,91	-	-	-	-	-	-	-
CV %	10,9	9,8	19,0	8,0	14,8	17,0	16,0	10,1	52,8	28,5
Nitrogênio ¹										
0	6,0	4,6	23,0	1,7	1,4	0,8	19,3	20,9	4,3	126,7
75	7,2	4,0	18,9	1,6	1,2	0,8	16,5	18,8	5,5	104,3
150	8,4	3,9	17,3	1,6	1,3	0,8	15,2	17,5	4,7	99,9
225	9,8	3,8	17,7	1,6	1,4	0,8	14,5	17,5	6,8	88,9
Efeito	L**	L**	L*	ns	ns	ns	L**	L**	ns	L*
R ²	1,0	0,8	-	-	-	-	0,9	0,9	-	0,9
CV %	12,1	12,5	14,8	7,6	11,4	8,8	16,6	10,5	52,9	38,3

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; L: efeito linear por análise de regressão; CV%: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação. ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estágio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

As análises de regressão não mostraram influência significativa das doses de K na concentração de N, P, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu e Fe na MSPA do milho (Tabela 10).

O teor de N na MSPA aumentou linearmente em função do incremento de doses de N (Tabela 10). Isto provavelmente ocorreu devido ao suprimento de N pela adubação nitrogenada de cobertura.

Silva et al. (2006c) obtiveram teores médios de $8,3 \text{ g kg}^{-1}$ de N na MSPA do milho, porém os teores não foram influenciados pelo incremento de doses de N.

A aplicação de doses crescentes de N na cultura do milho proporcionou aumento na concentração de N na MSPA, atingido a maior concentração de N, $10,95 \text{ g kg}^{-1}$, com a dose de 240 kg ha^{-1} de N (ARAÚJO et al., 2004).

As concentrações de P, K, Mn, Zn e Fe na MSPA do milho diminuíram com o aumento das doses de N, ajustando-se ao modelo linear. Tal comportamento deve estar relacionado com a translocação desses nutrientes da parte aérea para os grãos.

Na Tabela 11 são apresentados os valores de F para a concentração de nutrientes nos grãos do milho. As doses de K não influenciaram significativamente os teores de nutrientes nos grãos de milho. As doses de N exerceram efeitos significativos nas concentrações de N, K, S, Mn, Zn e Fe nos grãos do milho. Não houve efeito significativo das doses de N nas concentrações de P, Ca, Mg e Cu nos grãos de milho. As concentrações de nutrientes nos grãos de milho não foram influenciadas significativamente pela interação interação N $\times$ K.

Tabela 11 – Valores de F para concentração de nutrientes nos grãos de milho.

Causa da variação	N	P	K	Ca	Mg
Potássio (K)	1,88 ns	1,02 ns	1,02 ns	4,70 ns	0,83 ns
Nitrogênio (N)	71,57 **	2,56 ns	4,79 **	0,47 ns	0,82 ns
N $\times$ K	0,68 ns	1,17 ns	1,87 ns	0,98 ns	0,71 ns
CV % (K)	10,93	13,25	12,93	21,95	20,11
CV % (N)	8,57	13,54	12,83	24,87	20,35
(Continuação)					
Causa da variação	S	Mn	Zn	Cu	Fe
Potássio (K)	0,38 ns	0,87 ns	0,51 ns	0,58 ns	2,61 ns
Nitrogênio (N)	4,00 *	20,34 **	5,48 **	0,18 ns	21,99 **
N $\times$ K	0,35 ns	1,25 ns	1,28 ns	1,12 ns	0,34 ns
CV % (K)	16,49	21,62	17,72	69,34	17,69
CV % (N)	15,88	11,92	12,36	24,13	15,58

ns: não significativo; * $P > 0,05$; *: ($P < 0,05$); **: ($P < 0,01$); CV%: coeficiente de variação.

A aplicação de doses crescentes de K não afetou significativamente, pela análise de regressão, as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu e Fe nos grãos do milho (Tabela 12).

O incremento de doses de N aumentou linearmente as concentrações de N, P, K, S, Mn, Zn e Fe nos grãos de milho (Tabela 12). A redução dos teores dos nutrientes P, K, Mn, Zn e Fe na MSPA e o aumento nas concentrações desses nutrientes nos grãos na fase de maturação fisiológica evidencia a mobilização dos nutrientes dos órgãos de reserva (colmos e folhas) para os grãos, atendendo a maior demanda durante a fase de enchimento dos grãos do milho.

Tabela 12 – Concentração de nutrientes nos grãos do milho em função da adubação com doses de nitrogênio e potássio no sistema plantio direto.

Doses de nitrogênio e potássio no sistema plantio direto.										
Doses	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Zn	Cu	Fe
kg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
Potássio										
0	11,1	7,6	9,1	0,7	1,5	0,9	7,3	29,5	4,4	24,3
100	12,3	8,4	9,8	0,7	1,6	0,8	8,2	31,3	4,2	29,4
200	11,6	7,9	9,0	0,9	1,4	0,9	7,4	28,8	3,7	25,9
300	11,3	8,0	9,3	0,8	1,5	0,8	7,9	29,3	3,1	25,5
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
R ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	8,6	13,7	12,9	22,0	22,1	16,5	21,6	17,7	69,3	17,7
Nitrogênio ¹										
0	8,7	7,4	8,5	0,8	1,5	0,8	6,3	26,4	3,7	18,4
75	10,6	7,9	9,3	0,7	1,5	0,8	7,4	30,2	3,8	27,0
150	12,9	8,0	9,2	0,8	1,6	0,9	8,0	29,9	4,0	28,5
225	14,2	8,6	10,3	0,8	1,4	1,0	9,1	32,4	3,9	31,2
Efeito	L**	L*	L**	ns	ns	L**	L**	L**	ns	L**
R ²	1,0	0,9	0,8	-	-	1,0	1,0	0,8	-	1,0
CV%	8,2	13,9	14,4	24,9	20,4	14,4	12,3	12,8	24,1	14,1

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; L: efeito linear por análise de regressão; CV%: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação. ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estágio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

De acordo com Goes et al. (2013), o incremento de doses de N aplicadas em cobertura aumentou a concentração de N nos grãos de milho de 15,68 g kg⁻¹ no tratamento sem aplicação de N até 17,3 g kg⁻¹ na dose de 160 kg ha⁻¹ de N em cobertura.

Araújo et al. (2004) trabalhando com doses de N em sistemas de rotação de culturas, não observaram efeito significativo das doses de N sobre o teor de N nos grãos, obtendo-se o teor médio de 15,44 g kg⁻¹.

4.4 Extração de nutrientes pelas plantas de milho

Os valores de F para a extração de nutrientes pelas plantas de milho estão apresentados na Tabela 13. Não houve efeito significativo de doses de K na extração de nutrientes pela cultura do milho pelo teste F (Tabela 12). As doses de N aplicadas no milho influenciaram significativamente a extração de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn e Cu. Somente a extração de P foi influenciada significativamente pela interação N × K.

Tabela 13 – Valores de F para extração de nutrientes pelas plantas de milho.

Causa da variação	N	P	K	Ca	Mg
Potássio (K)	0,16 ns	0,68 ns	3,47 ns	2,18 ns	2,03 ns
Nitrogênio (N)	103,20 **	14,85 **	4,66 *	47,59 **	45,24 **
N × K	1,45 ns	3,17 *	1,06 ns	1,13 ns	1,66 ns
CV % (K)	15,4	12,7	20,8	13,2	17,2
CV % (N)	13,3	12,8	16,6	10,4	12,4

(Continuação)

Causa da variação	S	Mn	Zn	Cu	Fe
Potássio (K)	1,17 ns	3,58 ns	0,87 ns	0,73 ns	2,53 ns
Nitrogênio (N)	60,73 **	6,18 **	58,49 **	29,76 **	0,34 ns
N × K	1,79 ns	1,65 ns	0,85 ns	1,05 ns	1,28 ns
CV % (K)	15,5	14,4	21,6	41,5	33,5
CV % (N)	10,5	14,8	11,8	24,2	41,4

ns: não significativo; **: $P < 0,01$; CV%: coeficiente de variação.

As análises de regressão revelaram que somente a extração de K pela parte aérea da cultura do milho aumentou linearmente ($P < 0,01$) com as doses de K aplicadas (Tabela 14). Destaca-se que tal efeito ocorreu em solo com teor de K de $0,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Tabela 2), acima do nível crítico de $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a cultura do milho (EMBRAPA, 2012).

A extração de K obtida no tratamento controle, sem adubação potássica, foi de 353 kg K ha^{-1} com a produção de matéria seca da parte aérea de 13694 kg ha^{-1} . De acordo com a equação de regressão ajustada $[\text{K extraído (kg ha}^{-1}) = 371,6 + 0,3051\text{K (kg ha}^{-1})]$, houve aumento na extração de K de $0,3051 \text{ kg}$ para cada kg de K aplicado. Extração mais baixa de K pelo milho foi relatada por Coelho (2005), sendo que para a produção de matéria seca da parte aérea de 13890 kg ha^{-1} foi extraído 151 kg K ha^{-1} . Porém, Von Pinho et al. (2009) avaliaram a marcha de absorção de K em híbridos modernos de milho e obtiveram extração total de 316 kg K ha^{-1} com a produção de matéria seca da parte aérea de 15000 kg ha^{-1} . Mesmo com a elevada extração de K pelas plantas de milho observada no presente estudo, não houve efeito negativo na extração de Ca e Mg pela cultura.

A extração de N pela parte aérea do milho aumentou linearmente com as doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 14). No tratamento sem N em cobertura, a extração de N pela parte aérea foi de $93,4 \text{ kg ha}^{-1}$ e a produção de matéria seca da parte aérea foi de 10008 kg ha^{-1} . Isto corresponde à extração de $9,3 \text{ kg}$ de N para cada 1000 kg de MSPA. Considerando que foram aplicados 45 kg N ha^{-1} na semeadura, então a quantidade de N mineralizado e absorvido pelas plantas foi de $48,4 \text{ kg ha}^{-1}$. Resultados semelhantes foram obtidos por Araújo et al. (2004), os quais obtiveram extração de $83,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de N para produzir 10558 kg ha^{-1} de MSPA; subtraindo a quantidade de N aplicada no sulco de semeadura, estimou-se o aproveitamento de N mineralizado de $53,8 \text{ kg ha}^{-1}$. Desconsiderando-se as possíveis perdas de N ocorridas com a adubação nitrogenada, nas doses de 75 e 150 kg N ha^{-1} em cobertura, a estimativa da extração de N mineralizado pelo milho diminuiu para 36 e 15 kg ha^{-1} , respectivamente. A dose de 225 kg ha^{-1} de N em cobertura somada à quantidade de N fornecida na semeadura (45 kg ha^{-1}) superou a extração pelas plantas de milho, restando no solo 15 kg N ha^{-1} adicionado pela adubação nitrogenada.

O P extraído pelo milho aumentou de forma linear em função das doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 14). Considerando a maior dose de N aplicada em cobertura (225 kg N ha^{-1}), houve aumento da ordem de 40% na extração de P pela MSPA do milho em relação ao tratamento sem N em cobertura. Como a concentração de P na MSPA diminuiu com a aplicação de N (Tabela 10), a maior extração de P pela parte aérea com as doses de N aplicadas em cobertura certamente foi ocasionada pelo aumento na produção de matéria seca e pela maior concentração de P nos grãos (Tabela 12).

A extração de P foi significativamente afetada pela interação entre as doses de N e K aplicadas na cultura do milho. Na figura 4a, observa-se que houve aumento linear da extração de P pelas plantas de milho em função do aumento das doses de K dentro do tratamento controle de N (sem N). Em função da equação de regressão ajustada, o aumento da extração de P foi de $0,0652 \text{ kg}$ de P para cada kg de K aplicado. Porém, não houve efeito significativo das doses de K para a extração de P pelas plantas de milho dentro das doses de 75 e 150 kg ha^{-1} de N, obtendo-se em média, extração de $88,4$ e $96,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de P, respectivamente.

Houve redução significativa na extração de P em função do aumento das doses de K aplicadas no milho quando avaliadas dentro da dose de 225 kg ha^{-1} de N (Figura 4a). De acordo com a equação de regressão ajustada, a redução de extração de P foi de $0,1143 \text{ kg}$ de P para cada kg de K aplicado

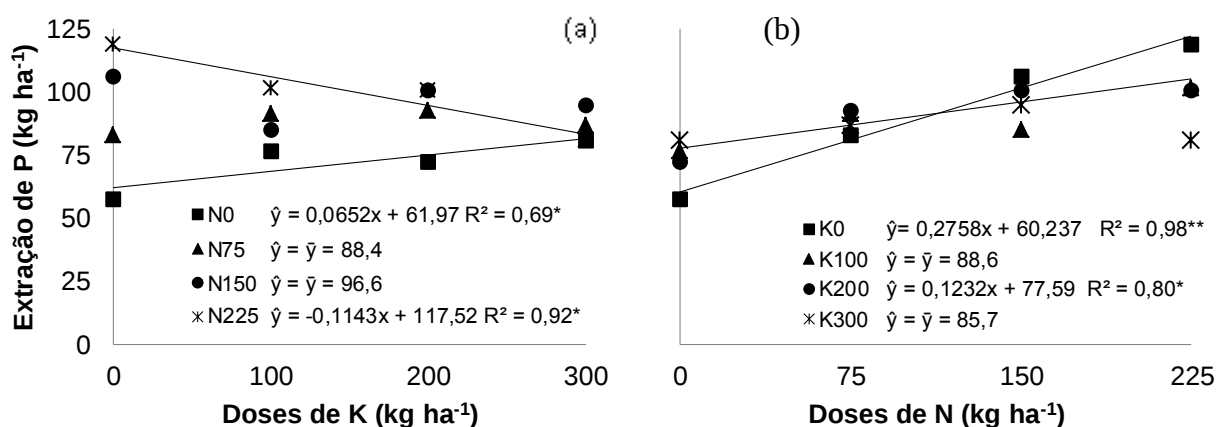


Figura 4 – Desdobramento da interação entre N e K para a extração de P pela massa seca da parte aérea (MSPA) na fase de maturação fisiológica em função da aplicação de K (a) e de N em cobertura (b). ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

A extração de P aumentou linearmente em função do incremento das doses de N aplicadas em cobertura dentro do tratamento sem K e para a dose de 200 kg ha⁻¹ de K (Figura 4b). De acordo com a equação ajustada, a extração de P aumentou em 0,2758 kg de P para cada kg de N aplicado em cobertura dentro do tratamento sem K e de 0,1232 kg de P para cada kg de N aplicado dentro do tratamento com a dose de 200 kg ha⁻¹ de K.

A análise de variância de regressão para o aumento das doses de N dentro das doses de 100 e 300 kg ha⁻¹ de K não foi significativa, sendo os valores médios de extração de 88,6 e 85,7 kg ha⁻¹ de P, respectivamente (Figura 4b).

Costa et al. (2008) trabalhando com doses de N e K em capim-xaraés obtiveram aumento linear da extração de P pela interação N x K. A aplicação da maior dose de K, 200 kg ha⁻¹ aumentou em 54,8% a extração de P em relação à testemunha sem K, enquanto que a maior dose de N proporcionou aumento na extração de P em 42,6% em relação à testemunha. Quando avaliado o efeito conjunto dos fatores, o aumento na extração de P foi de 97,4 %.

A extração de K aumentou de forma linear em função do aumento das doses de N aplicadas na cultura do milho (Tabela 14). A quantidade de K extraída pelo milho foi 28% maior na dose de 225 kg ha⁻¹ de N em relação ao tratamento sem N em cobertura. Isto deve estar relacionado à maior produção de MSPA e ao maior teor de K nos grãos (Tabela 10, Figura 3a) em função das doses de N aplicadas, pois a concentração de K nos tecidos da MSPA teve redução de 23%, comparando o tratamento sem N com a dose de 225 kg ha⁻¹ de N em cobertura (Tabela 10, Figura 3a).

Tabela 14 – Extração de nutrientes pela parte aérea da cultura do milho em função da adubação com doses de nitrogênio e potássio no sistema plantio direto.

Doses	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Zn	Cu	Fe
kg ha ⁻¹	-----kg ha ⁻¹ -----					-----g ha ⁻¹ -----				
Potássio										
0	175,4	91,3	353,0	36,2	30,3	17,8	332,6	343,0	70,5	1734,7
100	180,1	88,7	416,3	37,2	32,2	18,1	362,8	386,7	76,2	2019,9
200	182,6	91,4	460,4	33,0	27,6	16,2	334,2	343,2	72,4	1522,6
300	177,0	85,7	440,2	37,3	28,3	17,6	391,6	365,6	73,4	2160,1
Efeito	ns	ns	L**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
R ²	-	-	0,72	-	-	-	-	-	-	-
CV%	15,4	12,7	18,7	13,2	17,2	15,5	14,4	21,6	41,5	33,5
Nitrogênio ¹										
0	93,4	71,8	359,6	25,6	21,0	11,9	299,3	237,4	42,9	1695,4
75	156,4	88,4	415,0	35,7	27,2	17,0	364,5	351,8	58,6	1876,4
150	209,7	96,6	433,4	40,0	33,3	19,6	378,4	387,9	85,7	2010,3
225	255,5	100,4	461,8	42,4	36,9	21,3	379,1	461,3	105,3	1855,2
Efeito	L**	L**	L**	Q**	L**	Q**	L**	L**	L**	ns
R ²	0,99	0,91	0,95	0,99	0,99	0,98	0,74	0,99	0,99	-
CV%	13,3	12,8	16,6	10,4	12,1	10,5	14,9	11,8	24,1	41,4

ns: não significativo; **: $P < 0,01$; L e Q: efeito linear e quadrático por análise de regressão; CV%: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação. ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estágio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

As quantidades de Ca e S extraídas pela parte aérea do milho aumentaram de forma quadrática, enquanto o aumento na extração de Mg seguiu o modelo linear, em função das doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 14). Como as concentrações de Ca, Mg e S na MSPA não foram afetadas pelas doses de N (Tabela 10) e somente o teor de S nos grãos foi ligeiramente aumentado com as doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 12), a maior extração de Ca, Mg e S pelo milho em resposta às doses de N deve ter sido ocasionada principalmente pela maior produção de MSPA do milho.

A extração de Mn, Zn e Cu pela parte aérea do milho aumentou linearmente com as doses de N aplicadas (Tabela 14), provavelmente em resposta à maior produção de MSPA, uma vez que as concentrações de Mn e Zn nos tecidos da planta tiveram redução (Tabela 10) e a de Fe não foi afetada significativamente (Tabela 10) pelo aumento das quantidades de N aplicadas.

4.5 Exportação de nutrientes pelos grãos do milho

Na Tabela 15 encontram-se os valores de F da análise de varivância para a exportação de nutrientes pelas plantas de milho. Houve efeito significativo das doses

de K na exportação de Ca pelos grãos. As doses de N proporcionaram efeito significativo na exportação de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu e Fe pelos grãos. A exportação de nutrientes pelos grãos de milho não foi influenciada significativamente pela $N \times K$.

Tabela 15 – Valores de F para exportação de nutrientes pelos grãos de milho.

Causa da variação	N	P	K	Ca	Mg
Potássio (K)	0,68 ns	0,51 ns	0,53 ns	4,89 *	0,33 ns
Nitrogênio (N)	228,12 **	51,32 **	64,05 **	11,88 **	15,11 **
$N \times K$	0,72 ns	1,19 ns	1,56 ns	1,05 ns	0,78 ns
CV % (K)	20,8	28,9	25,1	23,1	34,1
CV % (N)	10,3	15,6	14,6	28,8	23,6

(Continuação)

Causa da variação	S	Mn	Zn	Cu	Fe
Potássio (K)	0,20 ns	0,80 ns	0,26 ns	0,31 ns	1,15 ns
Nitrogênio (N)	49,64 **	76,29 **	72,84 **	19,92 **	75,88 **
$N \times K$	0,29 ns	1,12 ns	1,00 ns	0,86 ns	0,54 ns
CV % (K)	16,2	32,6	29,7	74,7	28,8
CV % (N)	17,2	15,8	13,7	23,8	17,1

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; CV%: coeficiente de variação.

Apesar do efeito significativo das doses de K na exportação de Ca pelos grãos pelo teste F (Tabela 15), as análises de regressão mostraram que a exportação de todos os nutrientes pelos grãos de milho não foi significativamente afetada pelas doses de K (Tabela 16).

A quantidade de N exportada pelos grãos do milho foi aumentada linearmente em função das doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 16). De acordo com a equação de regressão ajustada $[N \text{ exportado (kg ha}^{-1}) = 48,82 + 0,46N \text{ (kg ha}^{-1})]$, a exportação de N pelos grãos foi aumentada em 0,4642 kg para cada kg de N aplicado em cobertura. Em relação ao total de N extraído pela cultura do milho (Tabela 14), a quantidade de N exportada pelos grãos foi de aproximadamente 50, 54, 59 e 58%, respectivamente para os tratamentos sem N e com 75, 150 e 225 kg N ha⁻¹ em cobertura. A taxa média de exportação de N pelos grãos de milho foi de 11,6 kg t⁻¹, variando de 8,7 kg t⁻¹, no tratamento sem N em cobertura, a 14,2 kg t⁻¹, no tratamento com a maior dose de N em cobertura (225 kg N ha⁻¹) (Tabela 11). Exportação de N pelo milho da ordem de 15,0 kg t⁻¹ foi relatada por Fancelli (2007).

Araújo et al. (2004) observaram aumento significativo na exportação de N pelos grãos do milho em função do incremento das doses de N aplicadas em cobertura até a dose de 120 kg ha⁻¹, alcançando 164 kg ha⁻¹ N exportado pelos grãos.

Tabela 16 – Exportação de nutrientes pelos grãos de milho em função da adubação com doses de nitrogênio e potássio no sistema plantio direto.

Doses	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Zn	Cu	Fe
kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹						g ha ⁻¹			
Potássio										
0	94,3	62,1	74,5	5,5	12,0	7,4	60,2	242,2	36,1	205,9
100	106,2	70,8	82,7	5,8	13,0	7,1	71,5	264,1	34,0	255,7
200	101,6	67,3	76,3	7,7	11,7	7,2	63,6	244,1	31,9	225,5
300	102,2	70,8	82,4	6,6	13,0	7,4	71,1	258,8	27,1	230,8
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
R ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV%	20,8	29,1	25,1	25,2	35,3	16,3	32,6	29,2	74,7	28,9
Nitrogênio ¹										
0	46,4	39,7	44,8	4,1	8,0	4,1	33,5	140,3	19,8	99,0
75	84,3	62,8	74,1	5,8	11,8	6,5	59,3	239,1	29,4	214,5
150	124,4	77,5	88,8	7,7	15,3	8,5	77,9	288,9	38,3	275,8
225	149,1	90,8	108,2	8,0	14,6	9,9	95,8	340,9	41,5	328,7
Efeito	L**	L**	L**	L**	Q**	L**	L**	L**	L**	L**
R ²	0,99	0,98	0,98	0,94	0,98	0,99	0,99	0,97	0,96	0,96
CV%	10,2	15,1	14,6	30,0	24,4	17,2	15,9	13,8	23,4	17,1

ns: não significativo; **: $P < 0,01$; L e Q: efeito linear e quadrático por análise de regressão; CV%: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação. ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estágio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

As doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho aumentaram de modo linear a exportação de P pelos grãos (Tabela 16). De acordo com a equação de regressão ajustada [P exportado (kg ha⁻¹) = 42,48 + 0,22N (kg ha⁻¹)], para cada kg de N aplicado em cobertura, houve incremento de 0,22 kg na exportação de P pelos grãos. Destaca-se que a concentração de P nos grãos de milho também aumentou linearmente com as doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 12). Em relação ao total de P extraído pela cultura do milho (Tabela 14), a quantidade de P exportada pelos grãos foi da ordem de 55, 70, 80 e 90%, respectivamente para os tratamentos sem N e com 75,150 e 225 kg N ha⁻¹ em cobertura.

A exportação de K pelos grãos de milho aumentou linearmente com as doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho (Tabela 16). O K foi o nutriente que apresentou maiores concentrações na MSPA (Tabela 10) e também o que foi extraído em maiores quantidades pela cultura do milho (Tabela 14). Considerando o total de K extraído pela cultura do milho (Tabela 14), a quantidade de K exportada pelos grãos foi aproximadamente 12, 18, 20 e 24%, respectivamente para os tratamentos sem N e com 75,150 e 225 kg N ha⁻¹ em cobertura. Nota-se que a taxa de exportação de K pelos grãos de milho aumentou com o incremento das

doses de N em cobertura. De acordo com a equação de regressão ajustada [K exportado (kg ha^{-1}) = $48,26 + 0,27N$ (kg ha^{-1})], a exportação de K pelos grãos foi aumentada em 0,27 kg para cada kg de N aplicado em cobertura. Essa informação pode ser útil para ajustar a recomendação de K em função das doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho, visando a reposição do K exportado para manter os teores de K no solo dentro de níveis adequados.

As quantidades de Ca e S exportadas pelos grãos de milho aumentaram linearmente, enquanto o aumento na exportação de Mg seguiu o modelo quadrático, em função das doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 16). Como as concentrações de Ca e Mg nos grãos não foram afetadas pelas doses de N e o teor de S nos grãos foi ligeiramente aumentado com as doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 12), a maior exportação de Ca, Mg e S pelos grãos de milho em resposta às doses de N deve ter sido influenciada pela produtividade de grãos da cultura.

As quantidades de Mn, Zn, Cu e Fe exportadas pelos grãos de milho foram aumentadas linearmente com as doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 16). Destaca-se que as doses de N em cobertura também aumentaram a concentração de Mn, Zn e Fe nos grãos (Tabela 12) e a extração de Mn, Zn e Cu pela parte aérea das plantas (Tabela 13). A exportação média de Mn, Zn, Cu e Fe pelos grãos de milho aumentou em 0,27, 0,87, 0,10, 1,00 g para cada kg de N aplicado em cobertura, respectivamente.

4.6 Eficiências de utilização de nitrogênio

Os valores de F referentes à eficiência de utilização de N pela cultura do milho estão apresentados na Tabela 17. As doses de K não influenciaram significativamente os valores de eficiência agrônômica (EA), eficiência fisiológica (EF), eficiência agrofisiológica (EAF), eficiência de recuperação aparente (ERA), fator parcial de produtividade (FPP) e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN). As doses de N em cobertura influenciaram de forma significativa os valores de EA, EF, FPP e EUN. Não houve efeito significativo da interação $N \times K$ nas eficiências de utilização de N.

A eficiência agrônômica (EA), que leva em consideração o aumento de produtividade em função da dose de N aplicada, foi reduzida pelo aumento das doses de N aplicadas em cobertura (Tabela 18). No entanto, a EA do N não foi influenciada significativamente pelo aumento das doses de K. A maior EA foi alcançada com a menor dose de N em cobertura (75 kg N ha^{-1}), ocasionando um

aumento de 35 kg de grãos de milho para cada kg de N aplicado em cobertura. Para as doses de 150 e 225 kg N ha⁻¹, o incremento na produção de grãos de milho foi de 29 e 23 kg para cada kg de N aplicado em cobertura, respectivamente.

Tabela 17- Valores de F para as eficiências de utilização de nitrogênio.

Causa da variação	EA	EF	EAF	ERA	FPP	EUN
Potássio (K)	2,30 ns	0,61 ns	3,04 ns	4,28 ns	0,75 ns	3,66 ns
Nitrogênio (N)	12,46 **	9,65 **	2,69 ns	1,55 ns	319,51 **	37,11 **
N × K	0,72 ns	1,59 ns	0,71 ns	0,56 ns	0,84 ns	0,99 ns
CV % (K)	13,6	26,1	26,4	21,7	11,1	19,8
CV % (N)	19,6	23,4	27,2	25,9	8,1	16,9

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; CV%: coeficiente de variação.

Tabela 18 – Eficiências de aproveitamento de nitrogênio pela cultura do milho em função das doses de potássio aplicadas em pre-semeadura e de nitrogênio aplicadas em cobertura no sistema plantio direto.

cobertura do sistema plantio direto.						
Doses	EA	EF	EAF	ERA	FPP	EUN
kg ha ⁻¹	-----kg kg ⁻¹ -----					
Potássio						
0	26,0	81,9	29,3	0,98	69,3	77,4
100	30,1	90,2	41,4	0,74	72,8	63,6
200	30,1	76,4	38,5	0,78	72,0	60,3
300	29,5	83,4	41,6	0,71	74,9	59,9
Efeito	ns	ns	L*	L*	ns	L**
R ²	-	-	0,58	0,66	-	0,77
CV %	17,8	27,2	26,4	21,7	11,0	19,8
Nitrogênio ¹						
0	-	-	-	-	-	-
75	34,6 a	100,3 a	42,3 a	0,88 a	105,6 a	85,8 a
150	29,0 ab	84,2 ab	38,3 a	0,79 a	64,5 b	63,1 b
225	23,1 b	65,5 b	32,6 a	0,74 a	46,7 c	47,0 c
DMS	5,9	20,5	10,8	0,22	6,2	11,7
CV %	19,6	23,4	27,2	26,0	8,1	17,0

EA: Eficiência Agronômica; EF: Eficiência Fisiológica; ERA: Eficiência de Recuperação Aparente; EAF: Eficiência Agrofisiológica; FPP: Fator Parcial de Produtividade; EUN: Eficiência de Uso do N. ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; DMS: Diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey. CV %: coeficiente de variação. ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estágio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

A quantidade de N acumulada e a produção de massa seca da parte aérea do milho (MSPA) permite determinar a eficiência fisiológica (EF) para cada dose de N empregada em cobertura. Na Tabela 18, observa-se que o incremento das doses de K não influenciaram a EF. No entanto, houve redução significativa na EF de acordo com o aumento das doses de N aplicadas em cobertura. O aumento da dose

de N de 75 para 150 kg ha⁻¹ reduziu em 16% a EF, e de 150 para 225 kg ha⁻¹, a redução da EF foi de 22%.

A eficiência agrofisiológica (EAF) aumentou linearmente em função do incremento das doses de K (Tabela 18). Desta forma, o incremento das doses de K aumentou a quantidade de grãos produzidos em relação ao aumento de N acumulado na MSPA. As doses de N aplicadas em cobertura não alteraram de forma significativa a EAF (Tabela 18). Isso significa que com o incremento das doses de N em cobertura não houve modificação no ganho de produtividade de grãos de milho em relação ao aumento de N acumulado na MSPA (EAF).

A eficiência de recuperação aparente (ERA) que considera a quantidade de N acumulada na MSPA em relação à quantidade de N aplicada, diminuiu linearmente em função do incremento das doses de K aplicadas na cultura do milho (Tabela 18). Porém, a ERA não foi influenciada significativamente pelo incremento de doses de N aplicadas em cobertura.

O fator parcial de produção (FPP), calculado pela relação entre a produtividade de grãos numa determinada dose de N e a quantidade de N aplicada, não foi significativamente afetado pelo incremento das doses de K, porém foi reduzido de forma significativa com o aumento das doses de N em cobertura (Tabela 18). A redução no FPP foi de 39% com o aumento da dose de N em cobertura de 75 para 150 kg N ha⁻¹, e de mais 28% quando a dose de N foi aumentada de 150 para 225 kg N ha⁻¹.

A eficiência de utilização de nitrogênio (EUN), obtida pelo produto de EF e ERA, foi reduzida significativamente em função do aumento das doses de K e de N aplicadas em cobertura (Tabela 18). De acordo com a equação ajustada [EUN (kg kg⁻¹) = 73,69 - 0,056 K (kg ha⁻¹)], a redução da EUN foi de 0,056 kg de MSPA para cada kg de K aplicado. A redução da EUN com o incremento das doses de K foi ocasionada principalmente pela redução linear na ERA, uma vez que a EF não foi influenciada pelas doses de K (Tabela 18). A EUN foi reduzida em 26% quando a dose de N passou de 75 para 150 kg N ha⁻¹ e de mais 26% quando a dose de N foi aumentada de 150 para 225 kg N ha⁻¹.

De acordo com Cantarela (2007), o suprimento balanceado de N e de K normalmente aumenta a resposta a ambos os elementos, porém a não-adição de um dos nutrientes em solos deficientes pode levar ao decréscimo na resposta do outro tanto em produtividade quanto em acúmulo do nutriente.

Farinelli e Lemos (2010), trabalhando com doses de N que variaram de 0 a 160 kg ha⁻¹ na cultura do milho, obtiveram redução na EA de 0,54 kg de grãos por

kg⁻¹ de N aplicado, sendo que a EA foi máxima (78,8 kg kg⁻¹) com a menor dose de N (40 kg ha⁻¹).

Fernandes et al. (2005) avaliaram a eficiência de utilização de N por seis híbridos de milho e constataram redução da EUN em função do aumento das doses de N para todos os híbridos de milho avaliados. O aproveitamento de N pelas plantas diminui com o aumento das doses de N certamente por causa do aumento que ocorre nas perdas de N com a aplicação de doses mais elevadas.

Freeman et al. (2007) avaliaram a recuperação de N pelo milho nas doses de 118, 236 e 354 kg N ha⁻¹ e verificaram que apenas 33%, 17% e 13% do N aplicado foi recuperado pelo milho, respectivamente. Os autores ressaltam que as maiores doses foram desnecessárias e que grande parte do N foi perdida para o ambiente apesar da melhoria da produtividade e na absorção de N com o aumento das doses aplicadas.

4.7 Alterações nos atributos da planta

Na Tabela 19 estão apresentados os valores de F para diâmetro do colmo, altura da planta e da inserção da espiga, e produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de milho. De acordo com o teste F, houve efeito significativo das doses de K na altura da planta e da inserção da espiga, e das doses de N no diâmetro do colmo, na altura da planta e da inserção da espiga, e na MSPA. A interação N × K não influenciou significativamente os atributos avaliados na planta de milho.

Tabela 19 – Valores de F para diâmetro do colmo, altura da planta e de inserção da espiga, e produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de milho.

Causa da variação	Diâmetro do colmo	Altura da planta	Altura de inserção da espiga	MSPA
Potássio (K)	0,84 ns	8,94 *	4,94 *	0,41 ns
Nitrogênio (N)	26,64 **	19,81 **	3,50 *	12,22 **
N × K	1,25 ns	1,13 ns	1,79 ns	0,72 ns
CV % (K)	9,7	2,7	7,1	20,5
CV % (N)	4,5	1,6	4,3	19,8

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; CV%: coeficiente de variação.

As análises de regressão mostraram que as doses de K aumentaram a altura da planta e de inserção da espiga, de acordo com o modelo quadrático e linear, respectivamente (Tabela 20). As maiores alturas da planta (2,8 m) e de inserção da espiga (1,8 m) foram obtidas com as maiores doses de K empregadas.

Tabela 20 – Diâmetro de colmo, altura da planta e de inserção da espiga, e produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho em função de doses de nitrogênio e potássio em sistema de plantio direto.

Doses	Diâmetro do colmo	Altura da planta	Altura de inserção da espiga	MSPA ¹
(kg ha ⁻¹)	(m)	(m)	(m)	(kg ha ⁻¹)
Potássio				
0	0,023	2,6	1,6	13694
100	0,023	2,7	1,7	14690
200	0,023	2,8	1,8	13504
300	0,025	2,8	1,8	14217
Efeito	ns	Q**	L*	ns
R ²	-	0,97	0,98	-
CV%	16,4	2,0	5,5	20,5
Nitrogênio¹				
0	0,020	2,6	1,7	10008
75	0,023	2,7	1,8	14346
150	0,024	2,8	1,7	16481
225	0,026	2,8	1,7	15261
Efeito	Q*	Q**	Q**	Q**
R ²	0,97	0,94	0,71	0,99
CV%	18,8	1,7	4,7	19,9

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; L e Q: efeito linear e quadrático por análise de regressão; CV%: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação. ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estágio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

O diâmetro do colmo e a produção de MSPA não foram afetados significativamente pelo aumento das doses de K (Tabela 20).

As doses de N aplicadas em cobertura aumentaram o diâmetro do colmo, a altura da planta e de inserção da espiga, e a produção de MSPA, conforme o modelo quadrático (Tabela 20).

Goes et al. (2013) também observaram efeito quadrático de doses de N sobre o diâmetro do colmo de plantas de milho, porém o diâmetro máximo foi obtido com a dose de 84 kg N ha⁻¹, inferior à encontrada no presente trabalho.

Gomes et al. (2007), trabalhando com doses de N que variaram de 0 a 150 kg ha⁻¹, obtiveram aumento de forma linear na altura das plantas de milho em função do incremento de doses de N, atingido 2,22 m com a dose de 150 kg ha⁻¹. Carvalho et al. (2007), avaliaram o efeito da aplicação de 108 kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho, sobre diferentes espécies de plantas de cobertura, obtiveram aumento no diâmetro do colmo, altura de inserção de espiga e altura de plantas em função da aplicação de N em cobertura na cultura do milho.

Silva et al. (2005), trabalhando com épocas e doses de aplicação de N, observaram que o incremento nas doses de N aplicadas no milho aumentou a altura de plantas e a altura de inserção das espigas de milho, obtendo os pontos de máximos com as doses de 171 e 158 kg ha⁻¹, respectivamente.

De acordo com Silva et al. (2006a), a altura de plantas teve correlação positiva com a produtividade de grãos de milho, de forma que as plantas maiores tendem a ser mais produtivas, porque sofrem menos estresse durante o desenvolvimento e acumulam maiores quantidades de reservas nos colmos.

De acordo com a resposta obtida para a produção de MSPA ($\hat{y}$, em kg ha⁻¹) em função das doses de N (x , em kg ha⁻¹) aplicadas ($\hat{y} = 9950,40 + 79,44x - 0,25x^2$), a máxima produção de MSPA seria alcançada com a aplicação de 160 kg N ha⁻¹ em cobertura.

O teste F mostrou que não houve influência significativa das doses de K e da interação N $\times$ K no número de fileiras de grãos por espiga (NFG), no número de grãos por fileira (NGF), no número de grãos por espiga (NGE), na massa da espiga (ME) e na massa de 1000 grãos (MMG) de milho (Tabela 21). As doses de N em cobertura influenciaram significativamente os atributos NGF, NGE, ME e MMG.

Tabela 21 – Valores de F para o número fileiras de grãos por espiga (NFG), o número de grãos por fileira (NGF), o número de grãos por espiga (NGE), a massa da espiga (ME) e a massa de 1000 grãos (MMG) de milho.

Causa da variação	NFG	NGF	NGE	ME	MMG
Potássio (K)	0,13 ns	0,51 ns	1,30 ns	0,57 ns	0,26 ns
Nitrogênio (N)	1,47 ns	88,91 **	100,10 **	212,42 **	55,02 **
N $\times$ K	0,71 ns	0,53 ns	1,06 ns	1,22 ns	0,43 ns
CV % (K)	3,8	3,7	3,1	8,3	8,9
CV % (N)	4,0	3,6	3,8	5,5	6,1

ns: não significativo; *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; CV%: coeficiente de variação.

O NFG por espiga não foi afetado significativamente pelas doses de N e K aplicadas na cultura do milho (Tabela 22). Isso certamente se deve ao fato de o NFG ser uma característica genética do híbrido que é definida entre a emissão da sétima e a nona folha, no estágio V₇-V₉ de desenvolvimento do milho (FANCELLI, 2011).

Os atributos NGF, NGE, ME e a MMG (Tabela 22) aumentaram significativamente com as doses de N aplicadas em cobertura, ajustando-se ao modelo quadrático. De acordo com a equação de regressão ajustada [$NGF = 24,94 + 0,067N - 0,0002N^2$ (kg ha⁻¹)], o maior NGF seria atingido com a dose de 166 kg N ha⁻¹ aplicado em cobertura, obtendo-se 31 grãos por fileira.

Tabela 22 – Número de fileiras de grãos por espiga (NFG), número de grãos por fileira (NGF), número de grãos por espiga (NGE), massa da espiga (ME) e massa de 1000 grãos (MMG) de milho em função de doses de nitrogênio e potássio em sistema plantio direto.

Doses	NFG	NGF	NGE	ME	MMG
(kg ha ⁻¹)				(g)	(g)
Potássio					
0	17,2	28,8	494,8	149,2	298,8
100	17,3	29,0	506,1	152,7	298,3
200	17,3	29,0	502,8	149,4	294,6
300	17,4	29,3	505,2	155,0	303,9
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns
R ²	-	-	-	-	-
CV%	3,8	4,3	3,1	8,3	8,9
Nitrogênio¹					
0	17,0	24,9	422,4	105,1	248,8
75	17,3	29,0	502,4	145,5	289,6
150	17,5	30,9	541,5	173,0	320,3
225	17,5	31,1	542,4	182,6	336,9
Efeito	ns	Q**	Q**	Q**	Q**
R ²	-	0,99	1,00	1,00	0,99
CV%	4,0	3,8	3,7	6,3	6,2

ns: não significativo; **: $P < 0,01$; Q: efeito quadrático por análise de regressão; CV%: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação. ¹ Doses de N aplicadas em cobertura no estágio V₄ da cultura do milho. Na semeadura do milho foram aplicados 45 kg N ha⁻¹.

O NGF no milho é definido entre os estádios de desenvolvimento V₁₂-V₁₄ (FANCELLI, 2011). Sendo assim, as doses de N que foram aplicadas quando as plantas encontravam-se no estágio V₄ foram aproveitadas para a definição do maior NGF entre os estádios V₁₂-V₁₄, aumentando também o NGE. Silva et al. (2005) obtiveram maior NGF com a aplicação de doses crescentes de N na cultura do milho, alcançando o ponto de máximo com a dose de 154 kg N ha⁻¹.

No tratamento controle, a ME foi de 105 g e o valor máximo, de 182 g, seria obtido com a dose de 233 kg N ha⁻¹, conforme a equação ajustada [ME (g) = 104,85 + 0,65N - 0,0014N² (kg ha⁻¹)]. O aumento da ME deve-se principalmente ao maior NGF e MMG obtidos pelo aumento das doses de N. Deparis et al. (2007) obtiveram aumentos lineares na massa de grãos por espiga por meio do incremento de doses de N, obtendo-se aumento de 0,071 kg de milho por kg de N aplicado.

De acordo com a equação ajustada para a massa de 1000 grãos [MMG (g) = 248,56 + 0,64N - 0,0011N² (kg ha⁻¹)], o valor máximo de MMG, de 340 g, seria obtido com a aplicação de 288 kg N ha⁻¹ em cobertura.

O aumento da MMG em função do incremento das doses de N aplicadas em cobertura deve estar relacionado com a prolongamento da área foliar proporcionada pelas maiores doses de N. Ferreira et al. (2001) observaram que aos 120 dias após a emergência do milho as plantas que receberam as menores doses de N estavam com as folhas secas até a altura das espigas, enquanto que nas maiores doses as folhas das plantas estavam mais verdes, prolongando o período de enchimento dos grãos.

Carvalho et al. (2007) observaram aumento de 16,7% na MMG quando aplicaram 108 kg ha^{-1} de N em comparação ao tratamento sem N. Silva et al. (2006a), trabalharam com plantas de cobertura e doses de N na cultura do milho, obtiveram aumento de forma quadrática no número de grãos por espiga e na MMG em função do aumento das doses de N quando cultivado após a cobertura de aveia preta. A maior resposta para o número de grãos por espiga, 496 grãos, foi obtida com a aplicação de 230 kg ha^{-1} de N, enquanto que a maior MMG, 366 g, foi obtida com a dose de 215 kg ha^{-1} de N. No entanto, Silva et al. (2005) trabalhando com doses crescentes de N, observaram aumento linear na MMG do milho em função do aumento das doses de N.

A Figura 5 ilustra os efeitos das doses de N aplicadas em cobertura nos sintomas de deficiência nas folhas baixas e afetando o tamanho das espigas de milho. Na figura 5a, tratamento controle, observa-se as folhas do terço inferior das plantas completamente secas, permitindo a passagem da luz solar diretamente para o solo, enquanto que, na figura 5d, 225 kg N ha^{-1} , observa-se que as folhas do terço inferior das plantas estão verdes e que a quantidade de luz solar que atinge o solo é mínima, ressaltando a importância da adubação nitrogenada para o melhor aproveitamento da energia luminosa.

4.8 Produtividade de grãos de milho

A produtividade de grãos de milho não foi influenciada significativamente pela interação N $\times$ K. As doses de K não ocasionaram alterações significativas na produtividade de milho, tendo-se obtido rendimento médio de 8355 kg ha^{-1} de grãos (Figura 6). Certamente, o teor médio de K trocável no solo, de $0,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,20 m (Tabela 2), foi suficiente para atender a demanda de K da cultura do milho. Deparis et al. (2007) também não observaram efeito significativo da adubação potássica na produtividade de grãos de milho em solo com teores de K trocável de 0,37 e $0,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente para as profundidades 0–0,10 e 0,10–0,20 m.

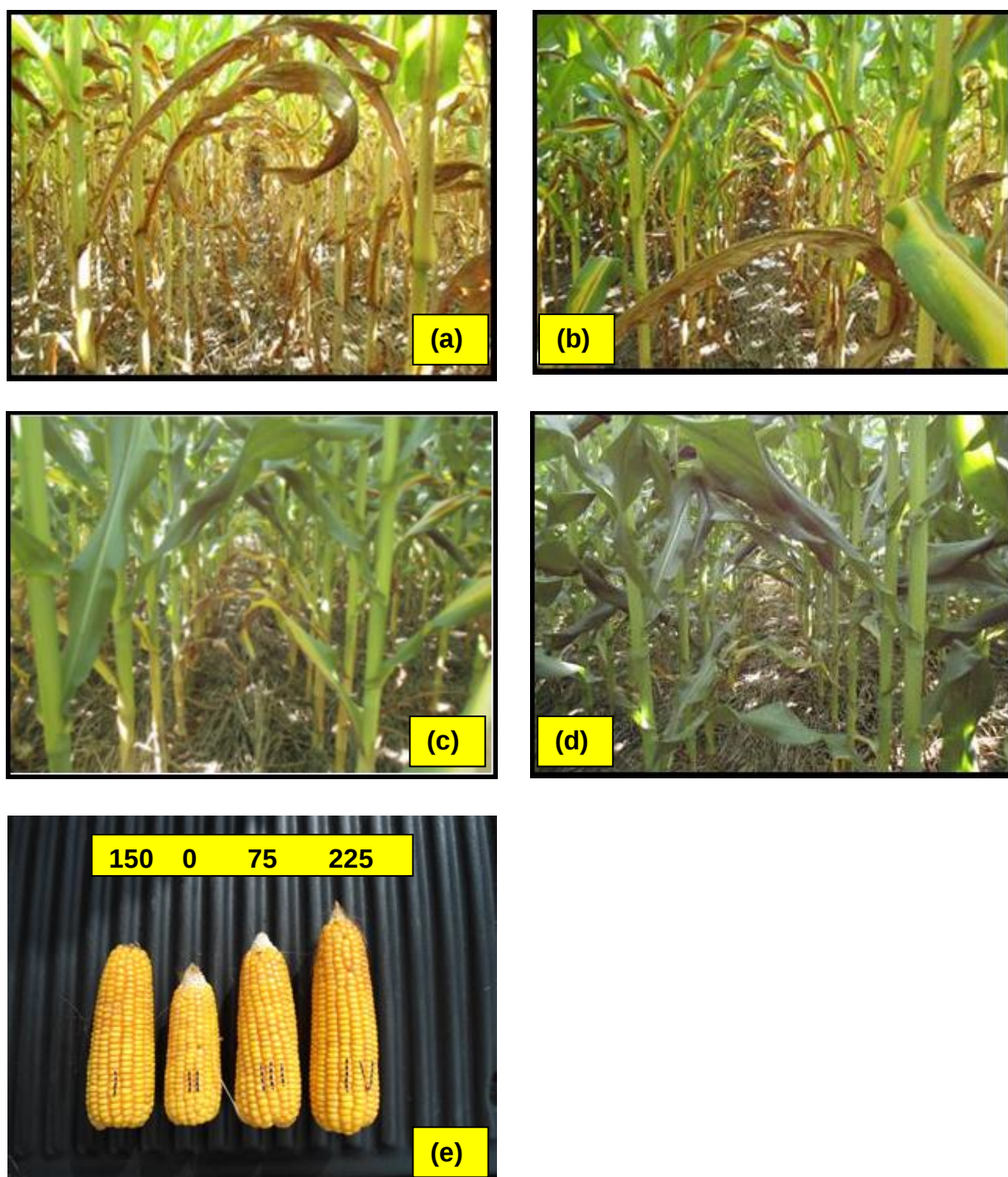


Figura 5 – Imagens dos tratamentos com doses de nitrogênio: (a): sem cobertura de N; (b): 75 kg ha⁻¹ N; (c): 150 kg ha⁻¹ e (d): 225 kg ha⁻¹; (e): tamanho de espigas de milho em função de doses de N aplicadas em cobertura na cultura do milho em sistema de plantio direto.

Wendling et al. (2008) observaram incrementos de produtividade de 11,7 kg de grãos para cada kg de K₂O aplicado quando o teor de K trocável no solo estava abaixo de 0,19 cmol_c dm⁻³.

A produtividade de milho aumentou de forma quadrática com as doses de N aplicadas em cobertura (Figura 6). A produtividade de grãos no tratamento controle,

com apenas 45 kg N ha⁻¹ na semeadura, foi de 5316 kg ha⁻¹. Esta produtividade esteve abaixo daquela obtida em experimento conduzido na mesma propriedade no ano de 2007, por Ferreira et al. (2009), no qual obteve-se produtividade de 8365 kg ha⁻¹ no tratamento controle, sem N na semeadura e em cobertura.

A baixa produtividade de milho obtida no tratamento sem N em cobertura, no presente estudo, pode ser explicada pela alteração na dinâmica de N no solo, uma vez que após o manejo da cultura da aveia, do início de agosto até o final de outubro, o volume de precipitação pluvial foi abaixo da média histórica da região (Figura 2). Como a palha da aveia possui elevada relação C/N, 35/1 (AITA et al., 2001), associado ao baixo volume de precipitação pluvial, deve ter prevalecido o processo de imobilização do N pelos microrganismos do solo, reduzindo a disponibilidade de N na fase inicial do desenvolvimento do milho.

A fase de florescimento do milho ocorreu final do mês de dezembro quando houve elevada precipitação pluvial, de 260 mm (Figura 2), o que deve ter favorecido as perdas de N por lixiviação de NO₃⁻. De acordo com Von Pinho et al. (2009), o acúmulo de N na fase inicial do milho é lenta, ocorrendo uma intensificação após 44 dias até a fase de maturação fisiológica.

Dessa forma, a maior imobilização durante a fase inicial de desenvolvimento do milho e as perdas de N do solo certamente ocorridas na fase de florescimento, quando a planta necessitava de maior quantidade de N, podem ter contribuído para a baixa produtividade de milho no tratamento controle desse estudo.

De acordo com a equação de regressão ajustada, a maior produtividade de grãos de milho (10620 kg ha⁻¹) seria obtida com a aplicação de 260 kg N ha⁻¹ em cobertura. Considerando que a maior dose de N empregada em cobertura foi de 225 kg N ha⁻¹, as doses de N utilizadas no estudo deveriam ter sido ainda maiores. Como foram aplicados 45 kg ha⁻¹ de N na semeadura, a maior produtividade de milho seria alcançada com a aplicação de 305 kg N ha⁻¹. Ferreira et al. (2009), trabalhando com diferentes quantidades de palha de aveia e com doses crescentes de N em sistema plantio direto de 18 anos, observaram que o milho respondeu de forma quadrática ao incremento de doses de N, alcançando a produtividade máxima, de 11150 kg ha⁻¹, com a dose de 156 kg N ha⁻¹. Certamente houve alta demanda de N na adubação no presente estudo porque o milho foi cultivado após aveia preta (elevada relação C/N), houve baixa precipitação pluvial nas fases iniciais de desenvolvimento das plantas e excesso de chuvas no florescimento da cultura. Mesmo assim, a necessidade de K na adubação do milho não foi alterada,

mostrando que o teor de $0,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K trocável na camada de 0–0,20 m foi suficiente para garantir produtividades de grãos da ordem de 10 t ha^{-1} de grãos.

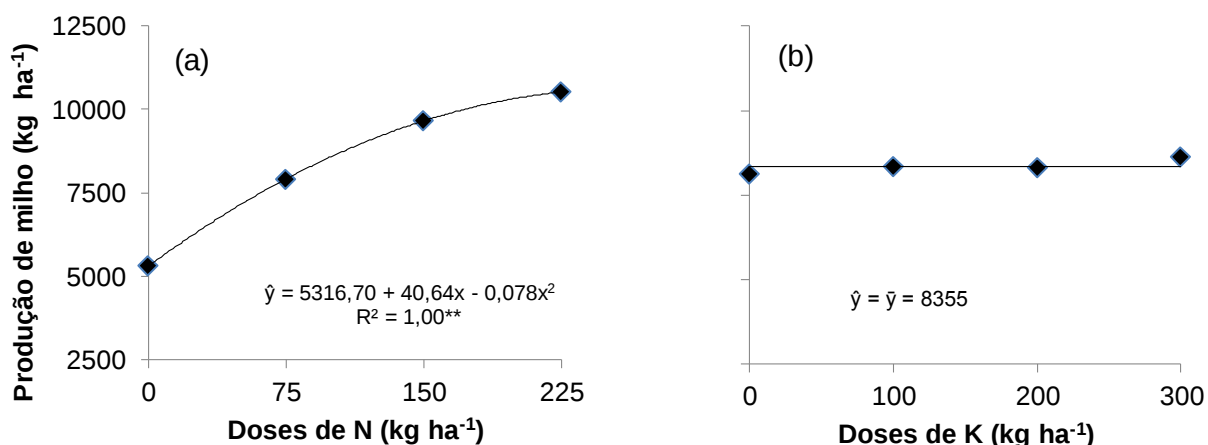


Figura 6 – Produtividade de grãos de milho de acordo com doses de nitrogênio (a) e potássio (b) aplicadas em cobertura em sistema de plantio direto. **: $P < 0,01$.

4.9 Relações entre os teores foliares de nutrientes e a produtividade relativa de milho

A produtividade relativa (PR) de milho esteve estreitamente relacionada com os teores foliares de N, P e S (Figura 6). As relações entre a PR de milho e os teores foliares de K, Ca e Mg foram pouco estreitas, revelando baixos valores de coeficiente de determinação (R^2).

A PR de milho respondeu linearmente ao aumento dos teores foliares de N, P e S (Figura 7). Considerando a PR de 95% como nível crítico para as concentrações de N, P e S nas folhas, de acordo com as equações de regressão ajustadas, os níveis críticos de N, P e S nas folhas do milho seriam, respectivamente, de 29,4, 6,0 e 2,0 g kg⁻¹. Esses resultados mostram que o aumento nos teores foliares de N, P e S proporcionado pelas doses de N em cobertura (Tabela 8) favoreceram a produtividade de grãos de milho.

4.10 Produtividade relativa de milho em função das relações N/P, N/K e N/S, e dos produtos N × P, N × K e N × S nas folhas

A produtividade relativa (PR) de milho em função das relações N/P, N/K e N/S, e dos produtos N × P, N × K e N × S nas folhas está apresentada na Figura 8.

Observa-se que a PR ajustou-se de forma linear tanto para as relações quanto para os produtos entre os nutrientes N, P, K e S nas folhas. No entanto, os produtos N × P, N × K e N × S apresentaram relações mais estreitas com a PR de milho do que as relações N/P, N/K e N/S. Isso mostra que a produtividade de milho é

melhor explicada pelo produto desses nutrientes do que pela sua relação nas folhas, especialmente para N e P, e N e S.

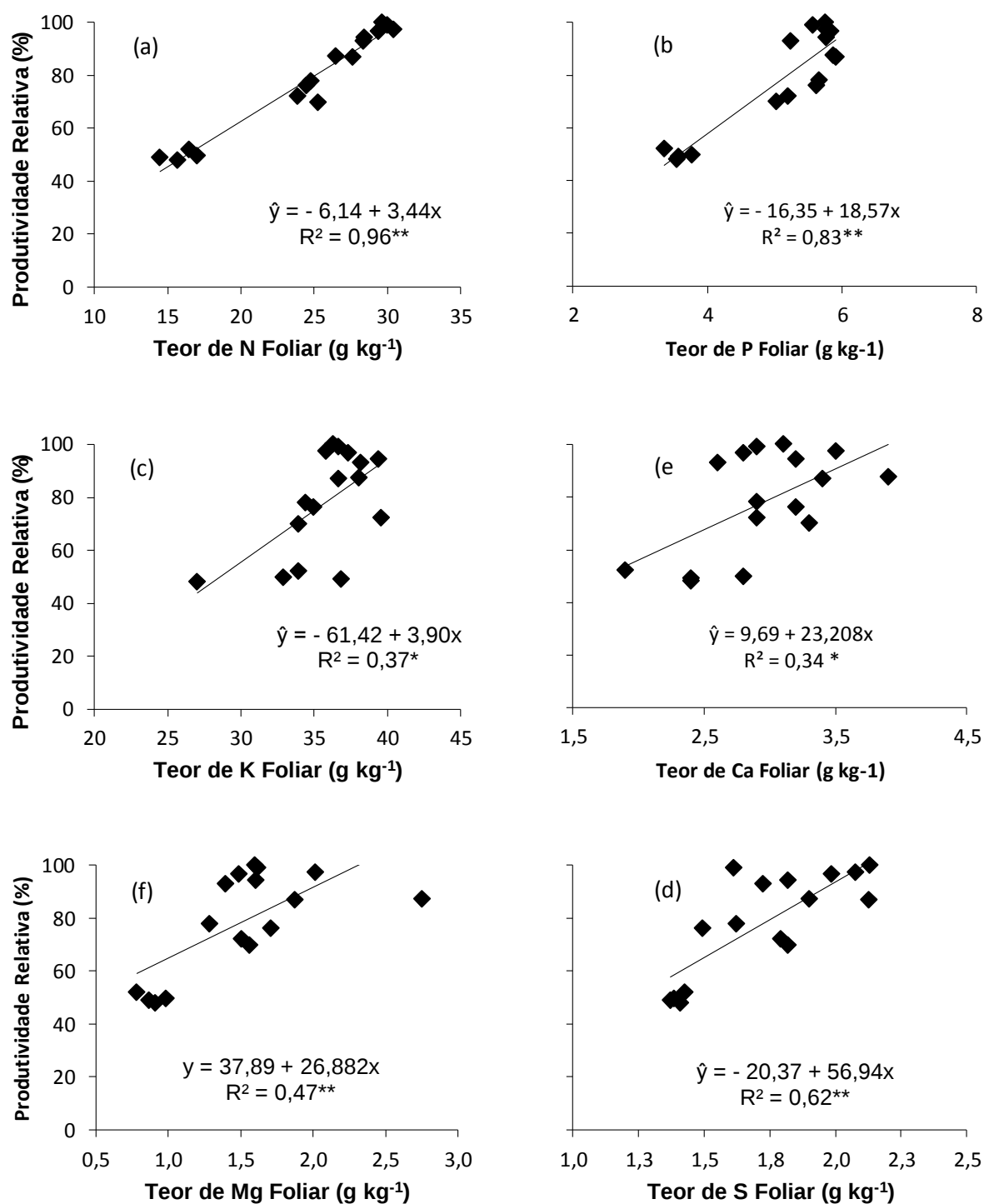


Figura 7 – Produtividade relativa de milho em função dos teores foliares de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f). *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$.

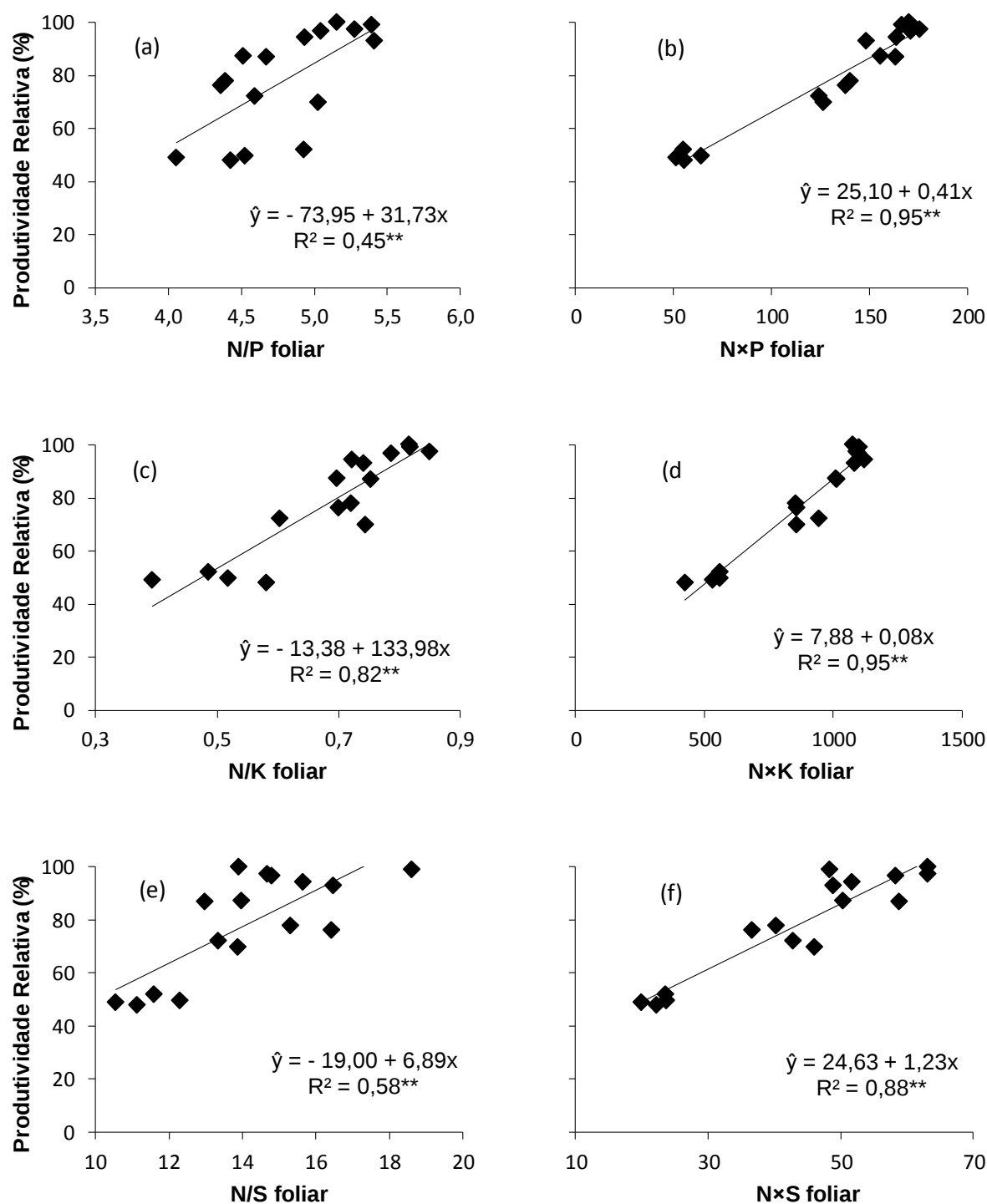


Figura 8 – Produtividade relativa de milho em função das relações N/P, N/K e N/S, e dos produtos N × P, N × K e N × S nas folhas. **: $P < 0,01$.

Considerando as equações de regressão ajustadas e a PR de 95% como nível crítico, os valores de nível crítico para os produtos N × P, N × K e N × S nas folhas de milho seriam, respectivamente de 170, 1089 e 57 (Figura 8).

5 CONCLUSÕES

1. A aplicação de 225 kg ha^{-1} de nitrogênio em cobertura, com 45 kg ha^{-1} de nitrogênio na semeadura, praticamente dobrou a produtividade de grãos de milho cultivado após aveia preta no sistema plantio direto.
2. A alta demanda de nitrogênio não aumentou a demanda de potássio na adubação do milho, em solo com teor suficiente de K trocável na camada de 0–0,20 m em sistema plantio direto.
3. A extração e a exportação de nutrientes pelo milho cultivado em plantio direto aumentaram em função do incremento de doses de N aplicadas em cobertura.
4. A eficiência de utilização de N pelo milho cultivado em plantio direto foi reduzida com o aumento das doses de N aplicadas em cobertura e não foi melhorada pela adubação potássica.
5. A produtividade relativa de milho ajustou-se melhor aos produtos $N \times P$, $N \times K$ e $N \times S$ do que às relações N/P , N/K e N/S nas folhas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G.; Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; BARROS, N. F. FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. 1ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. p. 646-662.
- AITA, C.; BASSO, C. J.; CERETA, C. A.; GONÇALVES, C. N.; DA ROS, C. O. Plantas de cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 157-165, 2001.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; HÜBNER, A. P.; CHIAPINOTTO, I. C.; FRIES, M. R. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto. I- Dinâmica do nitrogênio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 739-749, 2004.
- ALVAREZ V., V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; BARROS, N. F. FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. 1ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 596-635.
- ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T. de; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica 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.; FERNANDES, S. B. V. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o plantio em sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1. p. 179 – 189, 2000.
- AMTMANN, A.; HAMMOND, J. P.; ARMENGAUD, P.; WHITE, P. J. Nutrient sensing and signaling in plants: potassium and phosphorus. **Advances in Botanical Research**, v. 43, p. 209–257, 2006;
- ANDRADE, A. C.; FONSECA, D. M.; GOMIDE, J. A.; ALVAREZ V., V. H.; MARTINS, C. E.; SOUZA, D. P. H. Produtividade e valor nutritivo do capim elefante cv. Napier sob doses crescentes de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 6, p. 1589-1595, 2000.
- ANDREOTTI, M.; RODRIGUES, J.D.; CRUSCIOL, C. A. C.; SOUZA, E. C. A.; BÜLL, L.T. Crescimento do milho em função da saturação por bases e da adubação potássica. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 1, p 145-150. 2001.
- ARAÚJO, L. A. N de; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da; Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 8, p. 771-777, 2004.
- BELAY, A., CLAASSENS, A. S.; WEHNER, F. C. Effect of direct nitrogen and potassium and residual phosphorus fertilizers on soil chemical properties, microbial components and maize yield under long-term crop rotation. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 6, p. 420–427, 2002.

BRUNETTO, G; GATIBONI, L. C.; SANTOS, D. R. dos; SAGGIN, A.; KAMINSKI, J. Nível Crítico e Resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 565-571, 2005.

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T. **Cultura do Milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafós, 1993. p. 63-145.

CANTARELA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; BARROS, N. F. FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B., NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. 1ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 376-449.

CARVALHO, I. Q.; SILVA, M. J. S.; PISSAIA, A.; PAULETTI, V.; POSSOMAI, J. C. Espécies de cobertura de inverno e nitrogênio na cultura do milho em sistema de plantio direto. **Scientia Agraria**, v. 8, n. 2, p. 179-184, 2007.

CHEN, J.; GABELMAN, W. H. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium acquisition efficiency. **Science. Horticulture**, v. 83, p. 213-225, 2000.

COELHO, A. M. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **O potássio na agricultura brasileira**. 3. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. cap. 22. p. 613-658.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. **Nutrição Mineral do Milho**. Disponível em: <http://xa.yimg.com/kq/groups/35137484/1237253435/name/nutricaoadubacaomilho.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2013.

COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 7, p. 631-637, 2003.

COSTA, K. A. P.; ARAUJO, J. L.; FAQUIN, V.; OLIVEIRA, I. P.; FIGUEREDO, F. C.; GOMES, K. W. Extração de nutrientes pela fitomassa do capim-xaraés “xaraés” em função de doses de nitrogênio e potássio. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1162-1166, 2008.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quarto levantamento, Janeiro 2014, Brasília-DF. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_01_10_15_07_19_boletim_graos_janeiro_2014.pdf

CURI, N., KÄMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **O potássio na agricultura brasileira**. 3. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. cap. 4. p. 71-86.

DEPARIS, G. A.; LANA, M.C.; FRANDOLOSO, J.F. Espaçamento e adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura do milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, n. 4, p. 517-525, 2007.

DUETE, R.R.C.; MURAOKA, T.; SILVA, E.C. DA; AMBROSANO, E.J.; TRIVELIN, P.C.O. Acúmulo de N¹⁵ pelos grãos de milho em função da fonte nitrogenada em latossolo vermelho. **Bragantia**, v. 68, n. 2, p. 463-472, 2009.

EMBRAPA: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro. 2009. 412p.

EMBRAPA. 2012. Sistema de Produção: Cultivo do Milho. 8ª ed. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_8ed/referencias.htm.

ERNANI, P.R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J.A. DE; CASSOL, P.C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 393-401, 2007.

FAÇANHA, A.R; CARNELLAS, L. P.; DOBBS, L.B. Nutrição Mineral. In: KERBAUY, G.B. **Fisiologia Vegetal**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2004. 452p.

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 6-16, 1998.

FAGERIA, N.K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 11, p.1419-1424, 2001.

FANCELLI, A.L. Nitrogênio e enxofre nas culturas de milho e feijão. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S; VITTI, G.C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba, IPNI Brasil, 2007. Cap 13. p. 445-486.

FANCELLI, A.L. Fisiologia, fisiologia da produção e implicações práticas de manejo. In: **Milho: Produção e Produtividade**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, 2011. 176p.

FARINELLI, R.; LEMOS, L. B. Produtividade e eficiência agrônômica do milho em função da adubação nitrogenada e manejos do solo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 9, n. 2, 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, n. 2, p. 195-204, 2005.

FERNANDES, F. C. S.; LIBARDI, P. L. Drenagem interna e lixiviação de nitrato em um latossolo sob sucessão milho-brachiaria-milho, com diferentes doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1163-1173, 2009.

FERREIRA, A.C. B., ARAÚJO, G. A. A., PEREIRA, P. R.G., CARDOSO, A. A., Características agrônômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agrícola**, v.58, n.1, p. 131-138, 2001.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M; BRIEDIS, C.; FIGUEREDO, A. G. Desempenho de genótipos de milho cultivados com diferentes quantidades de palha de aveia-preta e dose de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 2, p. 173-179, 2009.

FONTOURA, S. M. V, VIEIRA, R. C. B, BAYER, C. MORAES, R. P. **Camada diagnóstica e critérios de manejo da fertilidade de solos em plantio direto na**

- Região Centro Sul do Paraná.** Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2011. 64p.
- FONTOURA, S.M.V., BAYER, C. Dinâmica do nitrogênio no solo, pré-culturas e manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho em plantio direto In: FONTOURA, S.M.V., BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto.** 2ª ed. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2009a. 232p.
- FONTOURA, S.M.V., BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região centro sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1721-1732, 2009b.
- FREEMAN, K. W.; GIRMA, K.; TEAL, R. K.; ARNALL, D. B.; TUBANA, B.; HOLTZ, S.; MOSALI, J.; RAUN, W. R. Long-term effects of nitrogen management practices on grain yield, nitrogen uptake, and efficiency in irrigated corn. **Journal of Plant Nutrition**, v. 30, p. 2021-2036, 2007.
- GOES, R.J., RODRIGUES, R.A.F., TAKASU, A.T., ARF, O. Características agronômicas e produtividade do milho sob fontes e doses de nitrogênio em cobertura no inverno. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 3, p. 250-259, 2013.
- GOMES, R.F., SILVA, A.G., ASSIS, R.L., PIRES, F.R. Efeito de doses e épocas de aplicação de nitrogênio nos caracteres agronômicos da cultura do milho em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 931-938, 2007.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO ESTADO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do Estado do Paraná 1994.** Londrina: IAPAR, 1994. 49 p.
- LARA CABEZAS, W. A. R.; SOUZA, M. A. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta à aplicação de misturas de uréia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2331-2342, 2008.
- KAMINSKI, J.; BRUNETO, G.; MOTERLE, D.F; RHEINHEIMER, D.S. Depleção de formas de K no solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5. p. 1003-1010, 2007.
- KOPITKE, P. M., MENIZES, N. W. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the ideal soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 2, p. 259-265, 2007.
- LAVRES Jr, J.; MONTEIRO, F. A. Perfilhamento, área foliar e sistema radicular do capim Mombaça submetido a combinações de doses de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 5, p. 1068-1075, 2003.
- LEAL, A.J.F., LAZARINI, E., RODRIGUES, L.R., MARCANDALLI, L.H. Adubação nitrogenada para milho com o uso de plantas de cobertura e modos de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 391-491, 2013.
- LIU, K., WIATRAK, P. Corn production response to tillage and nitrogen application in dry-land environment. **Soil & Tillage Research**, v. 124, p.138–143, 2012.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. Nitrogênio In: **Sistema de Plantio Direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA, 2004. 110p.

MAI, M.E.M., CERETA, C.A., BASSO, C.J., SILVEIRA, M.J. da, PAVINATO, A., PAVINATO, P.S. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia preta/milho no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 125-131, 2003.

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

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MEDEIROS, J.C., ALBUQUERQUE, J.A., MAFRA, A.L., DALLA ROSA, J., GATIBONI, L.C. Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 4, p. 799-806, 2008.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **O potássio na agricultura brasileira**. 3. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. cap. 7. p. 165-176.

NASCIMENTO, F. M.; BICUDO, S. J.; FERNANDES, D. M.; RODRIGUES, J. G. L.; FERNANDES, J. C. Diagnose foliar em plantas de milho em sistema de semeadura direta em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5. n. 1. p. 67-86, 2012.

NEVES, L. S. das; ERNANI, P.R.; SIMONETE, M. A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 25-32, 2009.

PAVINATO, P.S., CERETA, C.A., GIROTTI, E., MOREIRA, I.C.L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 358-364, 2008.

PETTIGREW, W. T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 4, p. 670-681, 2008.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Potafós, 1991. 343 p.

ROJAS, C. A. L.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WEBER, M. A.; VIEIRO, F. Volatilização de amônia da uréia alterada por sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura invernais no centro-sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 261-270, 2012.

ROSOLEM, C.A., MACHADO, J.R. BRINHOLI, O. Efeito das relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K do solo na produção de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 12, p. 1443-1448, 1984.

SÁ, J.C.M. Nitrogênio In: **Manejo da fertilidade do solo no plantio direto**. Castro: Aldeia Norte, 1993. 96p.

SÁ, J.C. de M.; SANTOS, J.B.; CARDOSO, E.G.; SIUTA JÚNIOR, D.; FERREIRA, C.F.; FERREIRA, A.O.; MASSINHAM, A.; SÁ, M.F.M. Manejo de fertilizantes nitrogenados em sistemas de produção envolvendo os cultivos de soja/trigo e soja/milho safrinha no sistema plantio direto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. e; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. v. 1, p. 567-649.

SANTOS, L.P.D; AQUINO, L.A; NUNES, P.H.M.P; XAVIER, F.O. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 3, p 270-279, 2013.

SCHLINDWEIN, J.A; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1669-1677, 2011.

SILVA, E. C. da; 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, n. 2; p. 353-362, 2005.

SILVA, D. A.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; ROSCOE, R. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na cultura do milho em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, n. 1, p 75-88, 2006a.

SILVA, E. C. da; MURAOKA, T.; GUIMARÃES, G.L.; BUZETTI, S. Acúmulo de nutrientes em plantas de cobertura e no milho cultivado em sucessão sob diferentes doses de N em plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, n.2, p 202-217, 2006b.

SILVA, E. C. da; 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, n. 3, p. 477-486, 2006c.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M, C.; VENZKE FILHO, S. P.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Mineralização e desnitrificação do nitrogênio no solo sob sistema plantio direto. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 975-982, 2010.

VIANA, E.M.; KIEHL, J.C. Doses de nitrogênio e potássio no crescimento do trigo. **Bragantia**, v. 69, n.4, p. 975-982, 2010.

VON PINHO, R. G.; BORGES, I.D.; PEREIRA, J. L. A. R.; REIS, M. C. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, n. 2. p. 153-173. 2009.

WENDLING, A, et al, Recomendação de adubação potássica para o trigo, milho e soja sob sistema de plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 32, n. 5, p. 1929-1939, 2008.

WERLE, R., GARCIA, R.A., ROSOLEM, C. A., Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, 2008.

WIETHÖLTER, S. Bases teóricas e experimentais de fatores relacionados com a disponibilidade de potássio do solo às plantas usando o trigo como referência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1011-1021, 2007.

WRAGE, N.; VELTHOF, G. L.; LAANBROEK, H. J.; OENEMA, O. Nitrous oxide production in grassland soils: assessing the contribution of nitrifier denitrification. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36. p. 229-236, 2004.

ZHANG, F., NIU, J., ZHANG, W., CHEN, X., LI, C., YUAN, L., XIE, J. Potassium nutrition of crops under varied regimes of nitrogen supply. **Plant and Soil**, v. 335, n. 1, p. 21-34, 2010.