

CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO, CRESCIMENTO RADICULAR E NUTRIÇÃO DO MILHO DE ACORDO COM A CALAGEM NA SUPERFÍCIE EM SISTEMA PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

E. F. CAIRES⁽²⁾, G. BARTH⁽³⁾, F. J. GARBUIO⁽³⁾ & M. T. KUSMAN⁽⁴⁾

RESUMO

Os efeitos das alterações químicas do solo, decorrentes da calagem na superfície, em sistema plantio direto, no crescimento radicular e na nutrição do milho não são muito conhecidos. Com o objetivo de estudar a correção da acidez do solo, o crescimento de raízes de milho (híbrido AG 9090), a nutrição da planta e seus reflexos sobre a produção de grãos, considerando a aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto, foi realizado um experimento em um Latossolo Vermelho distrófico textura média, em Ponta Grossa (PR). O delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas receberam quatro doses de calcário dolomítico na superfície (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹), em julho de 1993, e, nas subparcelas, foram reaplicadas duas doses de calcário dolomítico na superfície (0 e 3 t ha⁻¹), em junho de 2000. A calagem, após 92 meses, aumentou o pH, o Ca trocável e a saturação por bases e reduziu o Al trocável do solo, até à profundidade de 0,60 m. A reaplicação de calcário, após nove meses, proporcionou aumento no pH, Ca trocável e saturação por bases e redução no Al trocável do solo, até à profundidade de 0,20 m. A reação do calcário reaplicado na superfície foi mais rápida em condições de maior acidez do solo. Não houve limitação do crescimento radicular e da produção de milho para concentração de 10 mmol_c dm⁻³ de Al trocável, na ausência de déficit hídrico em solo com alto teor de matéria orgânica, mas a calagem na superfície melhorou a distribuição relativa de raízes na presença de solo compactado. O calcário dolomítico aplicado na superfície em plantio direto proporcionou redução no teor de K no tecido foliar do milho, sem alterar a produção de grãos.

Termos de indexação: *Zea mays* L., calcário dolomítico, cálcio, alumínio, nutrição mineral, sistema radicular.

⁽¹⁾ Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq. Recebido para publicação em outubro de 2001 e aprovado em julho de 2002.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG. Av. Gal. Carlos Cavalcanti, 4748, CEP 84030-900 Ponta Grossa (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: efcaires@uepg.br

⁽³⁾ Aluno do curso de Agronomia, PIC/UEPG.

⁽⁴⁾ Aluno do curso de Agronomia, Bolsista do PIBIC/CNPq.

SUMMARY: *INFLUENCE OF SURFACE LIME APPLICATION IN A NO-TILLAGE SYSTEM ON SOIL ACIDITY, CORN ROOT GROWTH AND NUTRITION*

The effects of superficial lime application on chemical soil characteristics in no-tillage systems and its influence on root growth and mineral nutrition in maize crops has not been thoroughly investigated yet. To evaluate these effects on maize (hybrid AG 9090) and its reflexes on the grain yield performance under no-tillage, a field trial was carried out on a dystrophic Red Latosol (Hapludox) in Ponta Grossa, State of Paraná, Brazil. A completely randomized block design with three replications was used in a split-plot experiment. In the main plots, four rates of dolomitic limestone were applied on the surface (0, 2, 4 and 6 t ha⁻¹) in July 1993, and two rates of dolomitic limestone (0 and 3 t ha⁻¹) reapplied on the surface of the subplots in June of 2000. After 92 months, liming had decreased the exchangeable Al and increased pH, exchangeable Ca and soil base saturation values, down to a depth of 0.60 m. Similar effects were observed nine months after lime reapplication down a depth of 0.20 m. Under higher soil acidity, lime reapplication upon the surface provided a faster reaction. Root growth and grain yields of corn, grown unaffected by water deficits and under high concentrations of organic matter, were not limited by concentrations of 10 mmol_c dm⁻³ of exchangeable Al in the soil. The relative root distribution, however, was improved by surface liming in compacted soil. Superficial dolomitic limestone application under no-tillage system caused an decrease of the K concentration in the corn leaves, without affecting the grain yield.

Index terms: Zea mays L., dolomitic limestone, calcium, aluminum, mineral nutrition, root system.

INTRODUÇÃO

A acidez do solo limita a produção agrícola em consideráveis áreas no mundo, em decorrência da toxidez causada por Al e Mn e da baixa saturação por bases (Coleman & Thomas, 1967); razão por que as raízes das plantas não crescem bem em solos ácidos (Pavan et al., 1982; Ritchey et al., 1982). A calagem é a prática mais eficiente para elevar o pH, os teores de Ca e a saturação por bases e reduzir Al e Mn trocáveis no solo.

A correção da acidez do solo é muito importante ao adequado desenvolvimento do milho, embora existam materiais genéticos mais tolerantes às condições de acidez (Cantarella, 1993). O aumento do pH do solo altera a disponibilidade de nutrientes, causando aumentos na absorção de N (Goodroad & Jellum, 1988), P, K, Ca e Mg (Lutz Jr. et al., 1972) pelo milho. São vários os trabalhos que demonstram aumentos consideráveis na produção de milho com a aplicação de calcário incorporado ao solo em sistema de preparo convencional (Gonzales-Erico et al., 1979; Camargo et al., 1982; Raij et al., 1983; Ernani et al., 1998). Mesmo os genótipos de milho com tolerância ao Al e que conseguem aprofundar seu sistema radicular em solos ácidos apresentam, normalmente, respostas positivas à calagem (Raij et al., 1998).

No sistema plantio direto, a correção da acidez do solo é feita mediante aplicação de calcário na

superfície, sem incorporação. A viabilidade de aplicação de calcário na superfície, avaliada pelo aumento na produção de grãos de milho nesse sistema de cultivo, foi demonstrada por Moschler et al. (1973). A eficiência da calagem superficial na neutralização da acidez do solo causada pela adubação nitrogenada do milho, cultivado no sistema plantio direto, com conseqüente aumento na produção de grãos, também foi observada por Blevins et al. (1978).

Em trabalhos recentes, têm sido verificadas respostas pouco expressivas do milho à aplicação superficial de calcário e altas produtividades da cultura (Pöttker & Ben, 1998; Caires et al., 1999; Rheinheimer et al., 2000) em solos ácidos manejados em plantio direto. As explicações para esse comportamento têm sido relacionadas com uma série de fatores inerentes a esse sistema de cultivo.

Os materiais vegetais, mantidos na superfície do solo, podem exercer efeitos positivos sobre a acidez, aumentando o pH e reduzindo o teor de Al (Miyazawa et al., 1993). A redução do teor de Al está associada com o aumento do pH e complexação orgânica. O maior teor de matéria orgânica e a maior concentração de nutrientes na superfície do solo, no sistema plantio direto, são dois fatores que alteram o comportamento do Al em solução. Essas duas características reduzem a atividade do Al e, conseqüentemente, sua toxidez, pela formação de complexos Al-orgânicos e pela maior força iônica da

solução do solo (Salet et al., 1994, citados por Anghinoni & Salet, 1998). O aumento na capacidade de troca de cátions do solo, decorrente do maior teor de matéria orgânica, pode proporcionar concentrações suficientes de cátions trocáveis, mesmo em solo com alta acidez (Caires et al., 1998). É importante considerar também que, no sistema plantio direto, há maior umidade nas camadas superficiais (Salton & Mielniczuk, 1995), graças à cobertura do solo, que reduz as perdas por evaporação.

Dessa forma, a adequada absorção de nutrientes pelas plantas em condições de solo ácido em sistema plantio direto (Caires & Fonseca, 2000) deve ser decorrência de maior umidade disponível no solo. Todavia, faltam informações a respeito das conseqüências da acidez e das alterações químicas do solo proporcionadas pela calagem na superfície sobre o crescimento radicular e sobre a nutrição do milho cultivado em sistema plantio direto.

O presente trabalho objetivou estudar a correção da acidez do solo, o crescimento de raízes de milho, a nutrição da planta e seus reflexos sobre a produção de grãos, considerando a aplicação de doses de calcário, com e sem a sua reaplicação na superfície, em sistema plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no município de Ponta Grossa (PR), Fazenda Estância dos Pinheiros, em um Latossolo Vermelho distrófico, manejado há 15 anos no sistema plantio direto. Análises químicas (Pavan et al., 1992) e granulométricas (EMBRAPA,

1997) do solo, da camada de 0-0,20 m, realizadas antes da instalação do experimento, revelaram os seguintes resultados: pH (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) 4,5; 58 mmol_c dm⁻³ de H + Al; 6 mmol_c dm⁻³ de Al³⁺; 16 mmol_c dm⁻³ de Ca²⁺; 10 mmol_c dm⁻³ de Mg²⁺; 1,4 mmol_c dm⁻³ de K⁺; 9 mg dm⁻³ de P (Mehlich-1); 19 g dm⁻³ de C-orgânico e 32 % de saturação por bases e teores de argila, silte e areia, respectivamente, de 220, 195 e 585 g kg⁻¹.

O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. Em parcelas de 50,4 m² (6,3 x 8,0 m), foram aplicadas, em julho de 1993, quatro doses de calcário dolomítico na superfície, com 84 % de PRNT: 0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹, calculadas visando elevar a saturação por bases da camada de 0-0,20 m de solo a 50, 70 e 90 %, respectivamente. Em junho de 2000, as parcelas foram divididas em duas subparcelas de 25,2 m² (6,3 x 4,0 m): sem e com a reaplicação de 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico na superfície, com 89 % de PRNT. Essa dose foi calculada visando elevar a saturação por bases a 65 % (Caires et al., 2000), considerando a análise química de amostra de solo retirada da camada de 0-0,20 m, do tratamento que havia recebido 4 t ha⁻¹ de calcário, em julho de 1993 (pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ = 4,6, CTC a pH 7,0 = 110,8 mmol_c dm⁻³ e 41 % de saturação por bases).

Os resultados de análises químicas de amostras de solo, coletadas até à profundidade de 0,20 m, considerando as doses de calcário aplicadas, antes da reaplicação do calcário, encontram-se no quadro 1. A reaplicação de calcário na superfície foi efetuada com o intuito de aumentar o gradiente dos atributos químicos do solo relacionados com a acidez.

Quadro 1. Resultados de análises químicas de amostras de solo, coletadas em diferentes profundidades, considerando as doses de calcário, antes da reaplicação de calcário na superfície em sistema plantio direto

Calcário	pH em CaCl ₂	H + Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Saturação por bases
t ha ⁻¹		mmol _c dm ⁻³					%
		0-0,05 m					
0	4,1	116	10	15	10	2,8	19
2	4,4	85	3	34	12	2,9	36
4	4,9	63	1	44	20	3,0	51
6	5,1	55	0	48	25	2,7	58
		0,05-0,10 m					
0	4,0	110	10	12	10	2,0	18
2	4,2	95	4	23	11	2,0	27
4	4,5	76	3	29	13	1,7	36
6	4,7	71	2	32	14	1,6	40
		0,10-0,20 m					
0	4,0	94	10	11	9	1,2	18
2	4,1	92	6	16	9	0,9	22
4	4,2	79	5	17	10	0,8	26
6	4,3	78	4	18	10	1,0	27

No período compreendido entre novembro de 1993 e maio de 2000, foram utilizados na rotação de culturas: soja (1993/1994), ervilhaca + aveia preta (inverno/1994), milho (1994/1995), pousio (inverno/1995), soja (1995/1996), trigo (inverno/1996), soja (1996/1997), triticale (inverno/1997), soja (1997/1998), aveia preta (inverno/1998), soja (1998/1999), aveia preta (inverno/1999) e soja (1999/2000).

A semeadura do milho foi feita em 30 de setembro de 2000, após o cultivo de aveia preta, na densidade de cinco sementes por metro linear e espaçamento de 0,9 m entre as linhas. Foi utilizado o híbrido AG 9090, da Agrocere, de tolerância intermediária ao Al (Furlani & Duarte, 2001). A adubação básica utilizada na semeadura foi de 330 kg ha⁻¹ da fórmula 10-20-20 e, em cobertura, foram aplicados 275 kg ha⁻¹ da fórmula 36-00-12, logo após a emissão da quarta folha. A temperatura média do ar e a precipitação pluvial durante o ciclo da cultura foram, respectivamente, de 21°C e 1.304 mm.

No início do florescimento da cultura, foram realizadas amostragens de folhas, plantas e raízes. As amostras de folhas foram coletadas em 30 plantas de cada subparcela, retirando-se a folha imediatamente abaixo e oposta à espiga, para análise química dos teores de N, P, K, Ca e Mg, de acordo com os métodos descritos por Malavolta et al. (1997). Foram retiradas cinco plantas, somente a parte aérea, ao acaso de cada subparcela, para avaliação da altura e da produção de matéria seca. As amostras de raízes foram coletadas por meio de trado cilíndrico, com 3,5 cm de diâmetro, em quatro profundidades (0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m), retirando-se seis subamostras, sendo três na linha de semeadura e três nas entrelinhas, equidistantes 0,10 m da planta, para compor uma amostra composta em cada subparcela. As raízes foram separadas do solo por dispersão em água, através de peneira de 0,5 mm. O comprimento de raízes foi estimado pelo método de Tennant (1975), e o raio médio, segundo Schenk & Barber (1979).

Após a maturação, o milho foi colhido e trilhado, sendo então determinada a produção de grãos a 13 % de umidade. Foram colhidas as cinco linhas centrais por 3,0 m de comprimento em cada subparcela, tendo sido desprezado 0,5 m de cada extremidade.

Após a colheita, foram coletadas amostras de solo, retirando-se, ao acaso, 12 subamostras por subparcela, para compor uma amostra composta das camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, e cinco subamostras, para as camadas de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m de profundidade. As amostras até à profundidade de 0,20 m foram retiradas com trado calador, e as de 0,20-0,60 m, com trado holandês, tendo sido determinados o pH, H + Al, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, P (Mehlich-1) e C-orgânico, de acordo com os métodos descritos em Pavan et al. (1992).

A resistência do solo à penetração foi avaliada por meio de penetrômetro de impacto, após a

colheita, em 15 pontos ao acaso dentro da área experimental, até à profundidade de 0,60 m, conforme o método de Stolf (1991).

Os resultados foram submetidos às análises de variância e de regressão polinomial. Foram ajustadas equações de regressão aos dados obtidos de acordo com as doses de calcário, adotando-se como critério para escolha do modelo a magnitude dos coeficientes de determinação significativos a 5 %. Os efeitos da reaplicação de calcário foram comparados pelo teste F.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância dos resultados de análise química do solo, nas cinco profundidades estudadas, mostrou interação significativa de doses e reaplicação de calcário para saturação por bases e cálcio trocável, na camada de 0-0,05 m, e alumínio trocável, nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m. A ausência de interação nas camadas mais profundas do solo mostra que as modificações nos atributos químicos do solo relacionados com acidez, dependendo das doses de calcário, foram semelhantes, na presença ou ausência de reaplicação de calcário na superfície.

A aplicação de doses de calcário na superfície, após 92 meses, proporcionou aumentos significativos no pH e na saturação por bases do solo, nas cinco profundidades estudadas (Figura 1). Os efeitos da reaplicação superficial de calcário sobre tais variáveis, após nove meses, foram significativos até à profundidade de 0,20 m, embora tenham ocorrido em maior magnitude nas camadas mais superficiais (0-0,05 e 0,05-0,10 m).

A interação significativa entre os tratamentos de calagem para saturação por bases, na camada superficial do solo (0-0,05 m), revelou que a reaplicação de calcário na superfície aumentou significativamente ($P < 0,01$) a saturação por bases do solo somente nas doses 0 e 2 t ha⁻¹ de calcário, de 18 % para 41 % e de 34 % para 50 %, respectivamente. Comportamento semelhante foi observado para o pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, na camada de 0-0,05 m, apesar de a interação entre doses e reaplicação de calcário para essa variável não ter sido significativa. Esses resultados mostram que a reação do calcário aplicado na superfície, em sistema plantio direto, é influenciada pela acidez do solo na camada superficial, sendo mais rápida ou mais lenta, respectivamente, em condições de maior ou menor acidez.

Considerando a média de doses de calcário, a sua reaplicação na superfície aumentou significativamente o pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ ($P < 0,01$) de 4,5 para 4,9 e 4,4 para 4,5, e a saturação por bases do solo de 28 % para 36 % ($P < 0,01$) e 21 % para 25 % ($P < 0,05$),

respectivamente, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Tendo em vista o tempo de reação do calcário reaplicado na superfície, de apenas nove meses, podem ser consideradas satisfatórias as alterações ocorridas no pH e na saturação por bases do solo com essa aplicação.

Houve aumento do Ca e redução do Al trocável do solo, nas cinco profundidades estudadas, considerando a aplicação de doses de calcário na superfície, após 92 meses (Figura 2). A reaplicação superficial de calcário, após nove meses, proporcionou alterações significativas nos teores de

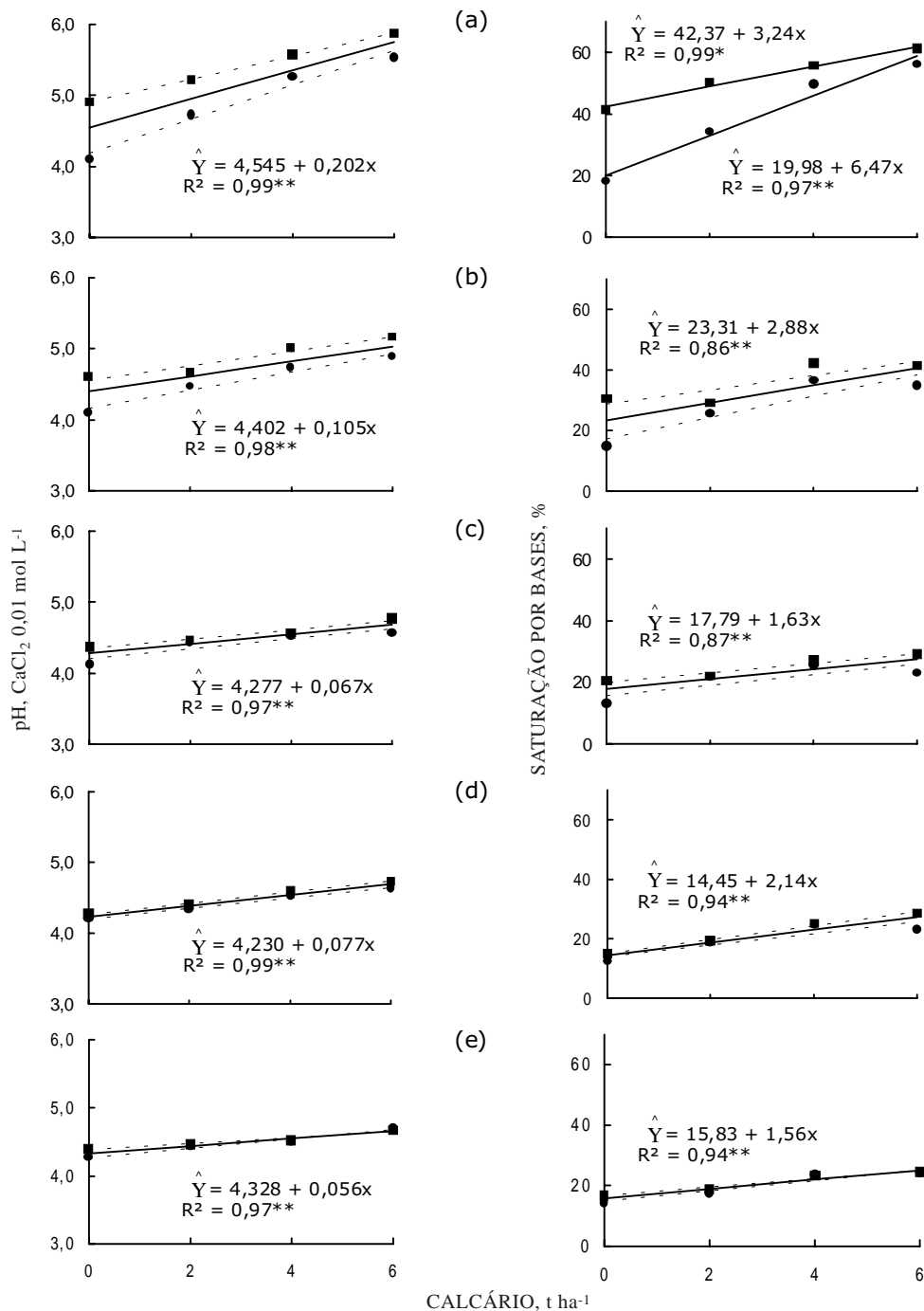


Figura 1. Alterações do pH em CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ e da saturação por bases, em diferentes profundidades do solo: 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,20 m (c), 0,20-0,40 m (d) e 0,40-0,60 m (e), considerando as doses de calcário na superfície, após 92 meses, sem (●) e com (■) a reaplicação de calcário, após nove meses, em sistema plantio direto. * = significativo P < 0,05 e ** = significativo P < 0,01.

Ca e Al trocáveis do solo, até à profundidade de 0,20 m. Mesmo assim, de forma semelhante ao ocorrido para o pH e saturação por bases, tais efeitos sobre o Ca e o Al trocável do solo foram mais acentuados nas camadas mais superficiais (0-0,05 e 0,05-0,10 m).

As interações entre doses e reaplicação de calcário para Ca trocável, na profundidade de 0-0,05 m, e Al trocável, nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, revelaram efeitos significativos da reaplicação ($P < 0,01$) somente na dose 0 t ha⁻¹ de calcário. Nessa condição de maior acidez do solo, a reaplicação de

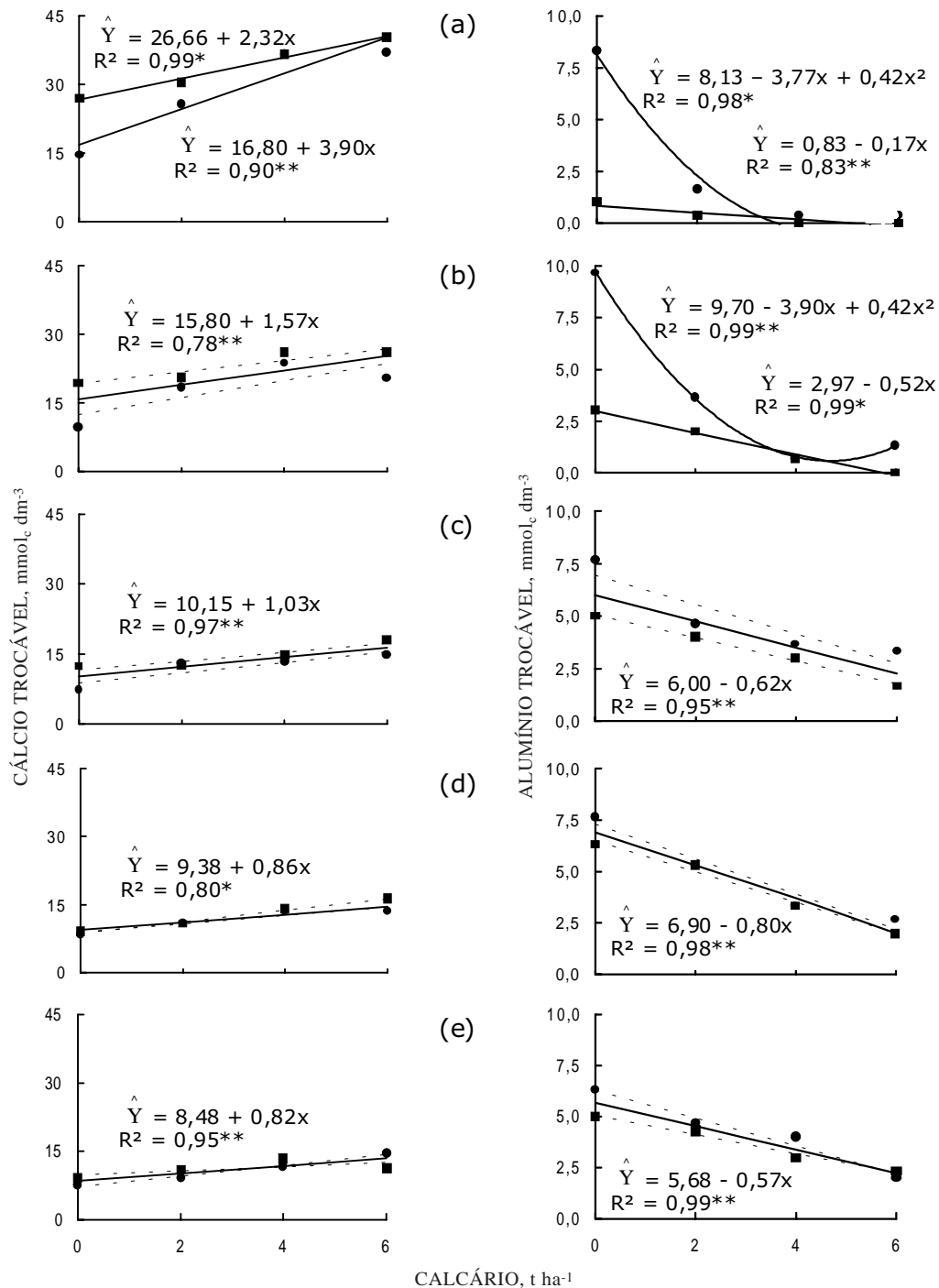


Figura 2. Alterações dos teores de Ca e Al trocáveis, em diferentes profundidades do solo: 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,20 m (c), 0,20-0,40 m (d) e 0,40-0,60 m (e), considerando as doses de calcário na superfície, após 92 meses, sem (●) e com (■) a reaplicação de calcário, após nove meses, em sistema plantio direto. * = significativo $P < 0,05$ e ** = significativo $P < 0,01$.

calcário na superfície proporcionou aumento do Ca trocável de 15 para 27 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (0-0,05 m), e redução do Al trocável de 8 para 1 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (0-0,05 m) e de 10 para 3 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (0,05-0,10 m).

Considerando a média de doses de calcário, a sua reaplicação na superfície aumentou significativamente o Ca trocável ($P < 0,05$) de 18 para 23 e 12 para 14 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, e reduziu o Al trocável do solo, na camada de 0,10-0,20 m, de 5 para 3 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ($P < 0,01$).

Os resultados da calagem na neutralização da acidez de subsolos são discordantes na literatura. Alguns trabalhos mostraram que o calcário não se movimenta para camadas mais profundas do solo (Gonzales-Erico et al., 1979; Ritchey et al., 1980; Pavan et al., 1984), enquanto outros revelaram consideráveis aumentos no pH e nos teores de Ca e Mg trocáveis abaixo da região de aplicação do calcário, tanto em áreas de cultivos anuais preparadas convencionalmente (Quaggio et al., 1993; Oliveira et al., 1997; Caires & Rosolem, 1998) quanto em áreas de cultivos perenes estabelecidos (Chaves et al., 1984; Pavan, 1994).

A eficiência da aplicação superficial de calcário na redução da acidez de camadas superficiais e do subsolo, no sistema plantio direto, foi demonstrada nos trabalhos de Oliveira & Pavan (1996) e Caires et al. (2000). A correção da acidez de subsolos pela calagem na superfície em tal sistema de cultivo tem sido atribuída não só à formação e movimentação descendente de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ para camadas mais profundas de solo (Costa, 2000), mas também ao deslocamento mecânico de partículas de calcário por meio de canais formados por raízes mortas, mantidos intactos em razão da ausência de preparo do solo (Pavan, 1994), e ao manejo de resíduos orgânicos de plantas (Miyazawa et al., 1996; Ziglio et al., 1999).

Além disso, muitos exemplos na literatura têm comprovado a correção da acidez de subsolos pela adição de calcário e fertilizantes nitrogenados (Pearson et al., 1962; Adams et al., 1967; Weir, 1975). É importante destacar, no presente estudo, que as plantas desenvolveram-se em variadas condições de acidez do solo (Figuras 1 e 2), conforme era esperado e pretendido.

A análise de variância não revelou interação significativa entre doses e reaplicação de calcário para nenhum dos parâmetros avaliados na planta. Por essa razão, as respostas do milho à aplicação de doses e à reaplicação de calcário foram analisadas, separadamente, por meio das médias dos tratamentos.

O crescimento radicular do milho até à profundidade de 0,60 m não foi influenciado significativamente pelos tratamentos de calagem,

encontrando-se valores médios de comprimento de raízes por superfície de solo, em cm cm^{-2} , de 61,6, 60,3, 56,2 e 59,9, respectivamente, para as doses 0, 2, 4 e 6 t ha^{-1} de calcário, e de 58,3 e 60,7, para os tratamentos sem e com a reaplicação de calcário. Esses resultados mostram que a concentração de 10 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Al trocável no solo (Quadro 1) não causou restrição ao crescimento radicular do milho cultivado no sistema plantio direto.

O comprimento relativo de raízes foi linearmente reduzido na camada superficial do solo (0-0,10 m) e aumentado no subsolo (0,20-0,60 m) com a aplicação de doses de calcário, mostrando que as raízes ficaram mais concentradas na superfície em condições de maior acidez (Figura 3). A reaplicação de calcário aumentou a concentração do comprimento radicular na profundidade de 0,10-0,20 m.

O raio médio de raízes de milho não foi alterado significativamente pelas doses e reaplicação de calcário na superfície (Figura 4). No entanto, na camada de 0,10-0,20 m, o raio médio das raízes foi maior do que na camada superficial (0-0,10 m), em consequência de maior compactação do solo naquela profundidade, verificada pela maior resistência ao penetrômetro (Figura 4). De acordo com Rosolem et al. (1994), a calagem pode exercer efeito positivo sobre os parâmetros morfológicos das raízes de milho, avaliados em camada de solo compactada. Isso explica o maior crescimento relativo de raízes na profundidade de 0,10-0,20 m, com a reaplicação de calcário na superfície (Figura 3), pois, nessa camada de solo, o comprimento relativo de raízes esteve relacionado ($P < 0,05$) positivamente com o Ca trocável ($r = 0,48$) e negativamente com o Al trocável ($r = -0,47$). Portanto, a distribuição relativa de raízes de milho, cultivado em sistema plantio direto, foi favorecida pela calagem superficial na presença de solo compactado.

A aplicação de doses de calcário aumentou os teores de Ca e Mg e reduziu a concentração de K nas folhas de milho, enquanto a reaplicação de calcário não alterou significativamente os teores foliares de nutrientes (Quadro 2). O K trocável no solo não apresentou alteração significativa, considerando os tratamentos de calagem, nas cinco profundidades estudadas. Os teores médios de K no solo, em $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, foram de 2,1 (0-0,05 m), 1,2 (0,05-0,10 m), 0,9 (0,10-0,20 m), 0,8 (0,20-0,40 m) e 0,6 (0,40-0,60 m). A redução da concentração de K nas folhas de milho esteve relacionada com o aumento da relação Ca + Mg/K no solo, na profundidade de 0-0,20 m, em decorrência da calagem (Figura 5).

As relações obtidas entre a concentração de K e a de Ca, Mg e Ca/Mg no tecido foliar de milho (Figura 6) mostram que a redução do teor foliar de K foi acompanhada por aumento dos teores de Ca e Mg nas folhas, evidenciando efeito substitutivo de

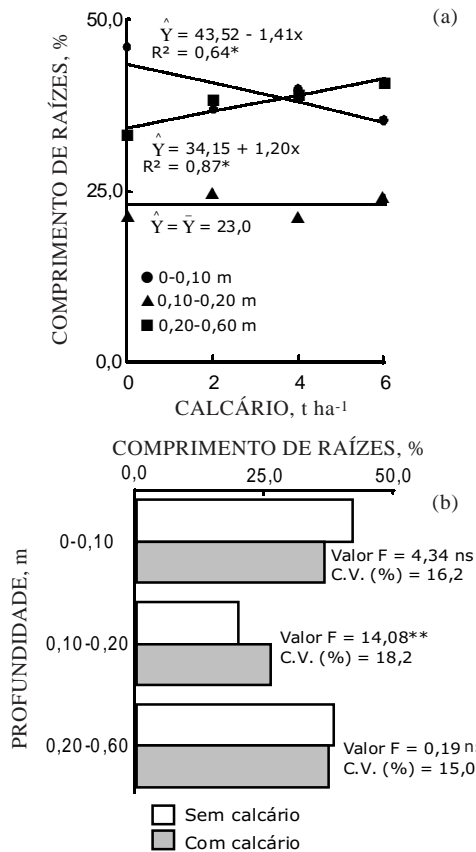


Figura 3. Distribuição relativa do comprimento de raízes de milho, em diferentes profundidades do solo, considerando a aplicação de doses (a) e a reaplicação (b) de calcário na superfície em sistema plantio direto. (a): médias de dois tratamentos de calagem e três repetições; b: médias de quatro doses de calcário e três repetições). ns = não-significativo, * = significativo $P < 0,05$ e ** = significativo $P < 0,01$.

K por Ca e Mg. A concentração de K no tecido foliar aumentou linearmente com o acréscimo da relação Ca/Mg nas folhas, mostrando o antagonismo entre Mg e K. Resultados semelhantes relacionados com a influência do Ca e do Mg sobre a absorção de K pelo milho foram obtidos em outros trabalhos (Loué, 1963; Andreotti et al., 2000).

Com respeito à composição do tecido foliar, a soma de Ca, Mg e K permanece constante, sendo de cerca de $1.000 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Viets et al., 1954, citados por Büll, 1993). No presente trabalho, a soma desses cátions nas folhas, considerando as doses de calcário aplicadas, esteve próxima desse valor, variando de 964 a $1.094 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Sendo assim, o cálculo das porcentagens de K, Ca e Mg dentro da soma dos cátions, praticamente constante, é válido para estudar o equilíbrio dos nutrientes catiônicos na cultura do milho (Loué, 1963). Considerando a soma dos três cátions no tecido foliar, foram observados

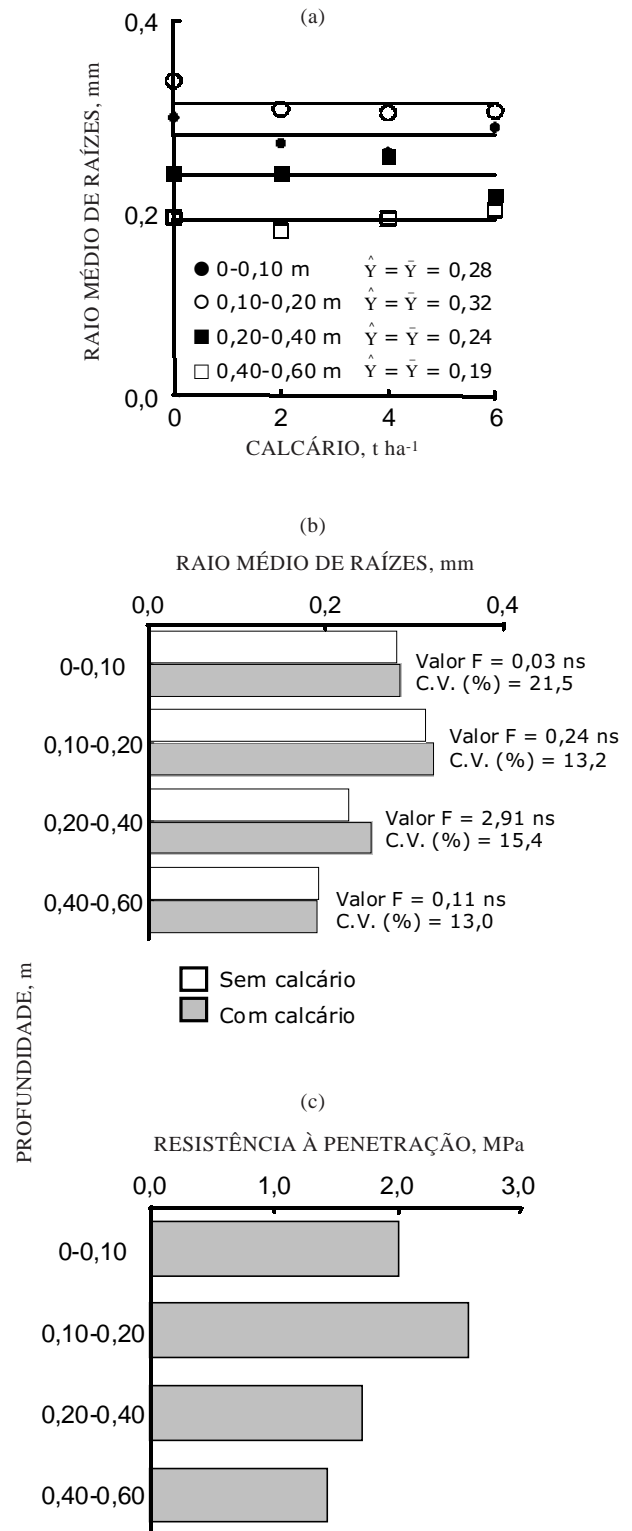


Figura 4. Raio médio de raízes de milho, considerando a aplicação de doses (a) e a reaplicação (b) de calcário na superfície em sistema plantio direto, e resistência do solo à penetração (c), em diferentes profundidades. (a): médias de dois tratamentos de calagem e três repetições; b: médias de quatro doses de calcário e três repetições). ns = não-significativo.

Quadro 2. Concentração de nutrientes nas folhas de milho, considerando as doses e a reaplicação de calcário na superfície em sistema plantio direto

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	
						g kg ⁻¹
Calcário, t ha ⁻¹						
0	30,9	3,0	20,5	5,8	1,8	
2	30,5	3,0	18,7	6,7	3,1	
4	31,4	3,0	16,6	6,8	3,4	
6	30,3	3,1	15,6	7,4	3,9	
Efeito	ns	ns	L**	L**	L**	
C.V. (%)	4,8	4,9	13,7	10,4	20,7	
Reaplicação de calcário						
Sem calcário	30,6	3,0	18,0	6,6	2,9	
Com calcário	31,0	3,1	17,7	6,8	3,2	
Valor F	0,56ns	2,58ns	0,11ns	1,92ns	0,92ns	
C.V. (%)	4,5	4,8	12,3	5,6	17,5	

L = efeito linear por regressão polinomial; ns = não-significativo; ** = significativo P < 0,01.

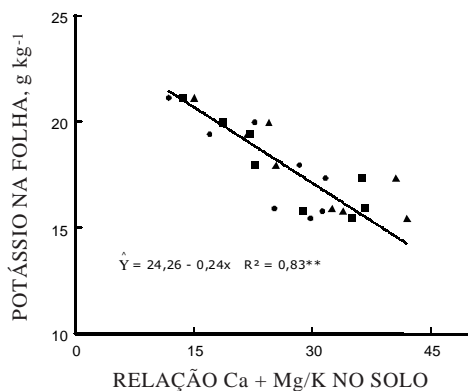


Figura 5. Concentração de potássio no tecido foliar de milho, considerando a relação Ca + Mg/K no solo, na profundidade de 0-0,20 m (● = 0-0,05 m, ▲ = 0,05-0,10 m e ■ = 0,10-0,20 m). ** = significativo P < 0,01.

54 % de K, 30 % de Ca e 16 % de Mg, na ausência de calagem, e 36 % de K, 34 % de Ca e 30 % de Mg, com a utilização da maior dose de calcário (6 t ha⁻¹). Tendo em vista que a relação nutricional ótima para o milho corresponde a equilíbrios entre 60-28-12 e 68-22-10 (K-Ca-Mg, em %) no tecido foliar (Loué, 1963), percebe-se que a calagem proporcionou desequilíbrios nutricionais de cátions na planta, principalmente entre Mg e K.

A altura das plantas de milho aumentou, de forma quadrática, com a aplicação de doses de calcário e não foi influenciada pela reaplicação de calcário no solo (Quadro 3). De acordo com a equação de regressão ajustada ($\hat{Y} = 2,585 + 0,090x - 0,013x^2$, $R^2 = 0,99$), a maior altura das plantas seria obtida com a dose de 3,5 t ha⁻¹ de calcário. Deve-se destacar que as plantas apresentaram, no início de seu crescimento, menor altura e clorose nas folhas (sintomas visuais),

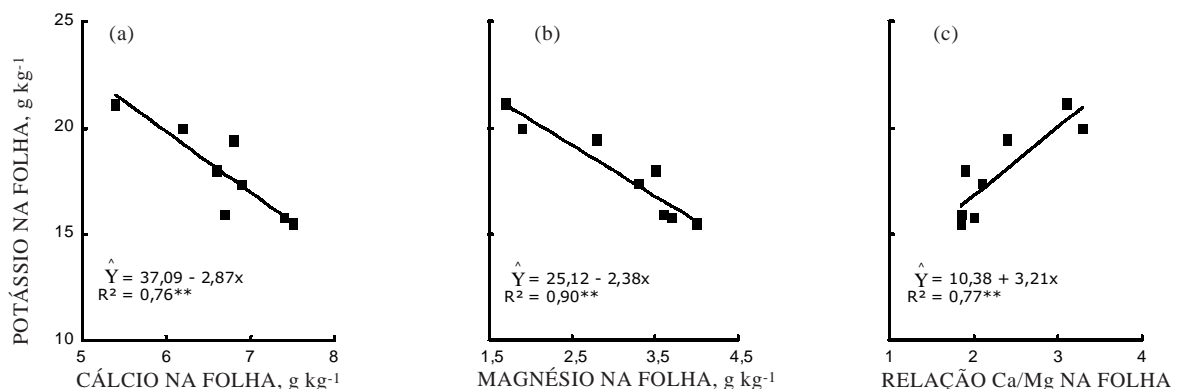


Figura 6. Relações entre a concentração de potássio e a de cálcio (a), magnésio (b) e Ca/Mg no tecido foliar de milho. ** = significativo P < 0,01.

Quadro 3. Altura das plantas, produção de matéria seca da parte aérea e de grãos de milho, considerando as doses e a reaplicação de calcário na superfície em sistema plantio direto

Tratamento	Altura da planta	Matéria seca da parte aérea	Produção de grãos
	m		
Calcário, t ha ⁻¹			
0	2,58	8.808	9.490
2	2,72	8.773	9.485
4	2,74	9.470	9.639
6	2,68	9.253	9.492
Efeito	Q*	ns	ns
C.V. (%)	4,0	11,4	3,8
Reaplicação de calcário			
Sem calcário	2,68	8.970	9.456
Com calcário	2,68	9.182	9.597
Valor F	0,10 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,75 ^{ns}
C.V. (%)	1,7	6,4	4,1

Q = efeito quadrático por regressão polinomial; ns = não-significativo; * = significativo P < 0,05.

somente em condições de maior acidez do solo (ausência de calagem). Mesmo assim, os tratamentos de calagem não proporcionaram alterações significativas na produção de matéria seca da parte aérea, avaliada no início do florescimento da cultura, e no rendimento de grãos de milho (Quadro 3). A produção média do experimento foi da ordem de 9.500 kg ha⁻¹ de grãos de milho.

Em solos ácidos manejados em plantio direto no sul do Brasil, altas produtividades de milho têm sido obtidas na ausência de calcário (Pöttker & Ben, 1998; Caires et al., 1999; Rheinheimer et al., 2000) e atribuídas ao menor efeito tóxico do Al, à relação de substituição de calcário pelo P (Ernani et al., 2000) ou à disponibilidade suficiente de Ca e Mg trocáveis, graças à elevada capacidade de troca de cátions decorrente do alto teor de matéria orgânica (Caires et al., 1998).

No presente trabalho, não houve limitação de P no solo para o desenvolvimento do milho. O P do solo (Mehlich-1) não foi alterado pela calagem, tendo sido encontrados teores médios de 12,5, 7,7 e 2,4 mg dm⁻³, respectivamente, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. O solo tinha teores suficientes de Ca e Mg trocáveis, e a concentração de 10 mmol_c dm⁻³ de Al trocável (Quadro 1) não limitou o crescimento radicular e a produção de milho. Tal ocorrência pode ser devida a duas causas principais: teores de matéria orgânica e condições de precipitação pluvial. A primeira causa diz respeito aos elevados teores de matéria orgânica do solo (48, 36 e 30 g dm⁻³, respectivamente, nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m). O Al pode formar complexos com ligantes orgânicos de baixo peso molecular, provenientes de resíduos vegetais

(Miyazawa et al., 1993), ou com ácidos fúlvicos da matéria orgânica estável, ocorrendo redução de sua atividade na solução do solo (Bloom et al., 1979). Produção de milho superior a 7.000 kg ha⁻¹, na ausência de calagem (pH em água de 4,7, Al trocável de 33 mmol_c dm⁻³ e 56 % de saturação por Al), também foi obtida em solo com alto teor de matéria orgânica, no sistema de preparo convencional (Ernani et al., 1998).

A segunda causa está relacionada com as excelentes condições de precipitação pluvial que ocorreram durante o ciclo da cultura no campo, considerando que a toxidez de Al para o milho é mais acentuada quando a disponibilidade de água no solo é baixa (Freire, 1984).

CONCLUSÕES

1. A calagem na superfície, em sistema plantio direto, apresentou eficiência na correção da acidez de camadas superficiais e do subsolo, mas a reação do calcário aplicado superficialmente foi mais rápida em condições de maior acidez do solo.

2. Na ausência de déficit hídrico, não houve limitação do crescimento radicular e da produção de milho para concentração de 10 mmol_c dm⁻³ de Al trocável em solo com elevado teor de matéria orgânica, mas a calagem na superfície melhorou a distribuição relativa de raízes na presença de solo compactado.

3. A aplicação superficial de calcário dolomítico em solo ácido com teores suficientes de Ca, Mg e K

trocáveis proporcionou substituição de K por Ca e, principalmente, Mg no tecido foliar do milho, sem causar conseqüências na produção de grãos.

LITERATURA CITADA

- ADAMS, F.; WHITE, A.W. & DAWSON, R.N. Influence of lime sources and rates on Coastal bermudagrass production, soil profile reaction, exchangeable Ca and Mg. *Agron. J.*, 59:147-149, 1967.
- ANDREOTTI, M.; SOUZA, E.C.A.; CRUSCIOL, C.A.; RODRIGUES, J.D. & BÜLL, L.T. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes pelo milho em razão da saturação por bases e da adubação potássica. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:2437-3446, 2000.
- ANGHINONI, I. & SALET, R.L. Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N.J., ed. *Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto*. Lages, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 1998. p.27-52.
- BLEVINS, R.L.; MURDOCK, L.W. & THOMAS, G.W. Effect of lime application on no-tillage and conventionally tilled corn. *Agron. J.*, 70:322-326, 1978.
- BLOOM, P.R.; McBRIDE, M.B. & WEAVER, R.M. Aluminum organic - matter in acid Soils - buffering and solution aluminum activity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:488-493, 1979.
- BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L.T. & CANTARELLA, H., eds. *Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba, POTAFOS, 1993. p.63-145.
- CAIRES, E.F. & FONSECA, A.F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. *Bragantia*, 59:213-220, 2000.
- CAIRES, E.F. & ROSOLEM, C.A. Correção da acidez do solo e desenvolvimento do sistema radicular do amendoim em função da calagem. *Bragantia*, 57:175-184, 1998.
- CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A. & FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:161-169, 2000.
- CAIRES, E.F.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. & FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:27-34, 1998.
- CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W.A. & MADRUGA, E.F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:315-327, 1999.
- CAMARGO, A.P.; RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; ROCHA, T.R.; NAGAI, V. & MASCARENHAS, H.A.A. Efeito da calagem nas produções de cinco cultivos de milho seguidos de algodão e soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 17:1007-1012, 1982.
- CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T. & CANTARELLA, H., eds. *Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba, POTAFOS, 1993. p.147-196.
- CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A. & IGUE, K. Resposta do cafeeiro à calagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:573-582, 1984.
- COLEMAN, N.T. & THOMAS, G.W. The basic chemistry of soil acidity. In: PEARSON, R.W. & ADAMS, F., eds. *Soil acidity and liming*. Madison, American Society of Agronomy, 1967. p.1-41.
- COSTA, A. Doses e modos de aplicação de calcário na implantação de sucessão soja trigo em sistema plantio direto. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 2000. 146p. (Tese de Doutorado)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L. & OLIVEIRA, L.C. Increase of grain and green matter of corn by liming. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:275-280, 1998.
- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; CAMPOS, M.L. & CAMILLO, R.J. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:537-544, 2000.
- FREIRE, J.C. Resposta do milho a níveis de água e formas de aplicação de calcário em dois solos originalmente sob cerrado em casa de vegetação. *R. Bras. Ci. Solo*, 8:305-308, 1984.
- FURLANI, P.R. & DUARTE, A.P. Tolerância ao alumínio em cultivares de milho. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA: valorização da produção e conservação de grãos no Mercosul, 6., Londrina, 2001. Anais. Londrina, FAPEAGRO, 2001. p.12.
- GONZALES-ERICO, E.; KAMPRATH, E.J.; NADERMANN, G.C. & SOARES, W.V. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of Central Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:1155-1158, 1979.
- GOODROAD, L.L. & JELLUM, M.D. Effect of N fertilizer rate and soil pH on N efficiency in corn. *Plant Soil*, 106:85-89, 1988.
- LOUÉ, A. Contribuição para o estudo da nutrição catiônica do milho, principalmente a do potássio. *Fertilité*, 20:1-57, 1963.
- LUTZ Jr., J.A.; GENTER, C.F. & HAWKINS, G.W. Effect of soil pH on element concentration and uptake by maize: I. P, K, Ca, Mg and Na. *Agron. J.*, 64:581-583, 1972.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319p.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:411-416, 1993.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & SANTOS, J.C.F. Effects of addition of crop residues on the leaching of Ca and Mg in Oxisols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., Belo Horizonte, 1996. Abstracts. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ EMBRAPA-CPAC, 1996. p.8.

- MOSCHLER, W.W.; MARTENS, D.C.; RICH, C.I. & SHEAR, G.H. Comparative lime effects on continuous no-tillage and conventionally tilled corn. *Agron. J.*, 65:781-783, 1973.
- OLIVEIRA, E.L. & PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. *Soil Till. Res.*, 38:47-57, 1996.
- OLIVEIRA, E.L.; PARRA, M.S. & COSTA, A. Resposta da cultura do milho, em um Latossolo Vermelho-Escuro álico, à calagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:65-70, 1997.
- PAVAN, M.A. Movimentação de calcário no solo através de técnicas de manejo da cobertura vegetal em pomares de macieira. *R. Bras. Frutic.*, 16:86-91, 1994.
- PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminum following lime and gypsum applications to a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:33-38, 1984.
- PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT, P.F. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO_3 and CaSO_4 . *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1201-1207, 1982.
- PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M. & ZOCOLER, D.C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina, Instituto Agronômico do Paraná, 1992. 38p. (Circular, 76)
- PEARSON, R.W.; ABRUNA, F. & VICENTE-CHANDLER, J. Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. *Soil Sci.*, 93:77-82, 1962.
- PÖTTKER, D. & BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:675-684, 1998.
- QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van; GALLO, P.B. & MASCARENHAS, H.A.A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 28:375-383, 1993.
- RAIJ, B. van; CAMARGO, A.P.; CANTARELLA, H. & SILVA, N.M. Alumínio trocável e saturação em bases como critérios para recomendação de calagem. *Bragantia*, 42:149-156, 1983.
- RAIJ, B. van; FURLANI, P.R.; QUAGGIO, J.A. & PETTINELLI Jr., A. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:101-108, 1998.
- RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J. & XAVIER, F.M. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. *Ci. Rural*, 30:263-268, 2000.
- RITCHEY, K.D.; SILVA, S.E. & COSTA, V.F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. *Soil Sci.*, 133:378-382, 1982.
- RITCHEY, K.D.; SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. & CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. *Agron. J.*, 72:40-44, 1980.
- ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSI FILHO, H. & MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:491-497, 1994.
- SALTON, J.C. & MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). *R. Bras. Ci. Solo*, 19:313-319, 1995.
- SCHENK, M.K. & BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. *Agron. J.*, 71:921-924, 1979.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:229-235, 1991.
- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.*, 63:995-1001, 1975.
- WEIR, C.C. Effect of lime and nitrogen application on citrus yields and on the downward movement of calcium and magnesium in a soil. *Trop. Agric.*, 51:230-234, 1975.
- ZIGLIO, C.M.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, M.A. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 42:257-262, 1999.