

SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

EFEITO DA CALAGEM E SULFATO DE AMÔNIO NO ALGODÃO. I - TRANSPORTE DE CÁTIONS E ÂNIONS NO SOLO⁽¹⁾

José Salvador Simoneti Foloni⁽²⁾ & Ciro Antonio Rosolem⁽³⁾

RESUMO

A calagem superficial tem sido utilizada em áreas manejadas no sistema de semeadura direta, causando excesso de cátions básicos nas camadas mais superficiais do perfil do solo. Por outro lado, a acidez do subsolo é considerada um entrave ao enraizamento profundo das plantas cultivadas. Este trabalho teve por objetivo avaliar a lixiviação de Ca e Mg trocáveis e de NO_3^- e SO_4^{2-} , considerando a forma de aplicação de calcário e a dose de adubação nitrogenada de cobertura no algodão, cultivado na presença de palha na superfície do solo. Utilizou-se um Latossolo Vermelho distroférico de textura média que foi acomodado em colunas de PVC subdivididas nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–50 cm de profundidade, totalizando 15,71 dm³. Plantas de algodão (*Gossypium hirsutum*) foram cultivadas por 60 dias na ausência de correção do solo, nas condições de calagem superficial sobre a palha e calagem incorporada a 0–20 cm de profundidade com aplicação de doses de sulfato de amônio equivalentes a 0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N em cobertura. A adubação com sulfato de amônio causou forte lixiviação de SO_4^{2-} no solo, independentemente da forma de aplicação de calcário. A calagem incorporada aumentou a disponibilização de NO_3^- na camada arável do solo, mas não aumentou a sua lixiviação, que ocorreu conforme a adubação nitrogenada mesmo no solo não corrigido. O sulfato de amônio intensificou a movimentação descendente de Ca^{2+} abaixo de 20 cm de profundidade no solo somente quando o calcário foi incorporado. A lixiviação de Mg^{2+} foi expressiva no perfil do solo, induzida pela adubação nitrogenada, até mesmo na ausência de aplicação do corretivo. Abaixo de 30 cm de profundidade no solo, o ânion SO_4^{2-} apresentou mais afinidade do que o NO_3^- na formação de pares iônicos com os cátions trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} , nas diferentes condições de calagem.

Termos de indexação: cálcio, magnésio, potássio, nitrato, plantio direto.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em abril de 2004 e aprovado em março de 2006.

⁽²⁾ Professor da Faculdade de Agronomia, Campus II, Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE. Rodovia Raposo Tavares, km 572, CEP 19067-175 Presidente Prudente (SP). E-mail: sfoloni@unoeste.br

⁽³⁾ Professor Titular Departamento de Produção Vegetal-FCA, Universidade do Estado de São Paulo – UNESP. Caixa Postal 237, CEP 18603-970 Botucatu (SP). E-mail: rosolem@fca.unesp.br

SUMMARY: EFFECT OF LIMING AND AMMONIUM SULFATE ON COTTON. I - CATION AND ANION TRANSPORT IN THE SOIL

*Applying lime on the soil surface in soils managed under no-tillage has caused an excess of basic cations in the most superficial layers of the soil profile. On the other hand, subsoil acidity is considered a constraint to the development of deep plant roots. The objective of this study was to evaluate Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- and SO_4^{2-} leaching in the soil profile as affected by liming and top dressing nitrogen fertilization in cotton, grown with straw cover on the soil surface. Cotton plants (*Gossypium hirsutum*) were grown for 60 days in PVC columns filled with a Distroferric Red Latosol (sand loam Rhodic Oxisol) with liming applied over the straw on the soil surface, incorporated liming 0–20 cm deep, or without liming. Nitrogen was applied at rates of 0, 50, 100 and 150 kg ha⁻¹ as ammonium sulfate. The PVC columns were set up in layers of 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 and 30–50 cm, totaling 15.71 dm³. The ammonium sulfate application caused intense leaching of SO_4^{2-} in the soil, irrespective of the lime application method. Liming increased the concentration of NO_3^- in the 0–20 cm soil layer, whereas the correction of the soil acidity did not affect the NO_3^- concentration in the 30–50 cm soil layer. The influence of ammonium sulfate on Ca^{2+} leaching below 20 cm was only observed in the soil with incorporated lime. Nitrogen application resulted in extensive Mg^{2+} leaching from the soil, regardless of the lime application method. In the soil layer below 30 cm, SO_4^{2-} presented a higher correlation than NO_3^- in the formation of ionic pairs with Ca^{2+} and Mg^{2+} .*

Index terms: calcium, magnesium, potassium, nitrate, no-tillage.

INTRODUÇÃO

Extensas áreas agricultáveis do Brasil apresentam solos com baixa capacidade de troca catiônica, predomínio de cargas dependentes de pH, baixas concentrações de Ca, Mg e K trocáveis e quantidades relativamente elevadas de Al trocável, especialmente em baixos valores de pH (Pavan & Roth, 1992). A calagem, por sua vez, é prática usual para a correção da acidez do solo; no entanto, os materiais corretivos utilizados são pouco solúveis em água, e os produtos da reação do calcário mostram mobilidade limitada no perfil do solo (Caires et al., 1999).

Em áreas cultivadas no sistema de semeadura direta, é comum a ocorrência de teores elevados de bases trocáveis nas camadas de 0–5 e 5–10 cm de profundidade, decorrente do não-revolvimento do solo, deposição de resíduos vegetais, calagem e adubação superficiais (Anghinoni & Salet, 1998). A incorporação mecânica do calcário por meio de aração e gradagem é uma forma de aumentar o volume de solo corrigido. No entanto, para Caires et al. (2003), no sistema de semeadura direta, a calagem superficial passou a ser considerada para reduzir gastos com máquinas e manter os benefícios que o sistema de manejo proporciona ao solo cultivado sem revolvimento. Em contrapartida, Ritchey et al. (1980) e Souza & Ritchey (1986) argumentaram que, em vastas regiões do Brasil Central, como nas do cerrado brasileiro, ocorrem períodos prolongados de déficit hídrico no decorrer da safra de verão (os chamados “veranicos”), razão por que é recomendada a correção da acidez do solo abaixo

de 20 cm de profundidade para favorecer o enraizamento profundo das plantas cultivadas e, com isso, minimizar os riscos de redução de produtividade.

A associação de cátions e ânions na solução do solo, com neutralização momentânea de cargas, pode intensificar a movimentação descendente de bases no perfil, como no caso do sulfato (SO_4^{2-}), adicionado via gessagem, que, sob determinadas condições, pode promover a lixiviação de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (Pavan et al., 1984). A acidez inibe a produção de nitrato (NO_3^-) em solos que recebem aplicação de amônio (NH_4^+); por outro lado, a nitrificação é favorecida pela calagem, formando ânions NO_3^- que são muito móveis no perfil do solo (Adams & Martin, 1984).

De acordo com Oliveira et al. (2002), os ânions SO_4^{2-} e NO_3^- , provenientes da mineralização dos resíduos orgânicos depositados na superfície do solo, assim como das adubações nitrogenadas e fosfatadas, quando são utilizados, por exemplo, sulfato de amônio e superfosfato simples como fontes de N e P, podem funcionar como “carregadores” de Ca^{2+} e Mg^{2+} para camadas subsuperficiais do solo. No trabalho de Ritchey et al. (1980), demonstrou-se que, em áreas submetidas à calagem incorporada, a aplicação de superfosfato simples na camada arável (0–20 cm de profundidade) promoveu aumento de pH, elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e redução da saturação por Al^{3+} do subsolo. No trabalho de Pearson et al. (1962), verificou-se que a adubação nitrogenada intensificou a movimentação de Ca^{2+} e Mg^{2+} ao longo do perfil de solos tropicais submetidos à calagem, e o efeito do corretivo no subsolo foi atribuído à formação de sais

solúveis sujeitos à lixiviação, com destaque para a adubação com sulfato de amônio.

Sendo assim, a lixiviação de bases no perfil do solo pode ser intensificada na presença de NO_3^- e SO_4^{2-} , melhorando a fertilidade abaixo da camada arável, favorecendo o enraizamento profundo de plantas cultivadas. Este trabalho teve por objetivo avaliar a lixiviação dos cátions trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} e dos ânions NO_3^- e SO_4^{2-} , ao longo do perfil do solo, considerando a forma de aplicação de calcário, em interação com doses de sulfato de amônio aplicadas em cobertura no algodão, cultivado com palha na superfície do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação do Departamento de Produção Vegetal, da Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, em Botucatu (SP). Utilizou-se terra coletada de 0–20 cm de profundidade de um Latossolo Vermelho distroférrico (Carvalho et al., 1983; Embrapa, 1999) de textura média (660 g kg^{-1} de areia, 280 g kg^{-1} de argila e 60 g kg^{-1} de silte). A terra foi seca ao ar e passada em peneira com malha de 4 mm. A análise química (Raij & Quaggio, 1983) revelou os seguintes valores: pH (CaCl_2 1 mol L^{-1}) 3,7; 34 g dm^{-3} de M.O.; 3,0 mg dm^{-3} de P_{resina} ; 135 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de H+Al; 0,6 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de K; 4,0 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Ca; 1,0 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Mg; 5,6 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de SB; 140 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de CTC e 4 % de saturação por bases (V). A capacidade de campo da porção de solo desestruturada (peneirada), sob drenagem livre, foi determinada a -0,03 MPa no aparelho extrator de Richards (Embrapa, 1997), e o valor encontrado foi de 180 g kg^{-1} . Aplicou-se o equivalente a 2,8 t ha^{-1} de calcário dolomítico (CaO: 28 %, MgO: 20 %, PN: 99 % e PRNT: 95 %) em toda a terra peneirada, antes de se iniciar o experimento, uma vez que a saturação por bases e o pH eram inadequados para o cultivo do algodoeiro. A terra corrigida foi mantida em sacos de plástico por 30 dias com o teor de água a 180 g kg^{-1} (capacidade de campo). Em seguida, o solo foi seco ao ar novamente e adubado com 150 mg dm^{-3} de P, 120 mg dm^{-3} de K e 25 mg dm^{-3} de N, nas formas de KH_2PO_4 e $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Foram aplicados 2,0 mg dm^{-3} de B, 2,0 mg dm^{-3} de Mn, 6,0 mg dm^{-3} de Zn e 1,5 mg dm^{-3} de Cu, como H_3BO_3 , MnSO_4 , ZnSO_4 e CuSO_4 , respectivamente.

Os vasos foram montados, utilizando cinco anéis de PVC rígido sobrepostos, com 20 cm de diâmetro interno, correspondendo às seguintes profundidades: 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–50 cm, totalizando 15,71 dm^3 . A terra foi acondicionada nos vasos de forma a ser estabelecida uma densidade de 1,2 kg dm^{-3} , correspondente às condições de campo. Para simular a cobertura do solo, utilizou-se palha de milheto picada em pedaços de 2 a 4 cm, seca em estufa de aeração forçada a 60 °C, por 72 h, em quantidade equivalente a 4 t ha^{-1} .

Os tratamentos constituíram-se de três formas de aplicação de calcário (sem calcário e calcário superficial – em cima da palha e calcário incorporado de 0–20 cm de profundidade) e quatro doses de N aplicadas em cobertura (0, 50, 100 e 150 kg ha^{-1}), como sulfato de amônio. Utilizou-se, nesta etapa, o mesmo calcário dolomítico descrito anteriormente, numa dose correspondente a 5 t ha^{-1} , que, somada à dose de 2,8 t ha^{-1} , aplicada anteriormente, completou 7,8 t ha^{-1} de corretivo, correspondente à quantidade recomendada para elevar a saturação por bases a 60 % (Quaggio & Raij, 1996). O calcário foi aplicado dez dias antes da semeadura do algodão (*Gossypium hirsutum*, var. IAC-22), de acordo com os tratamentos. As doses de sulfato de amônio foram calculadas, considerando-se um cultivo de algodoeiro com espaçamento entre linhas de 0,90 m, aplicando-se a quantidade correspondente a 0,20 cm de linha a cada vaso, de acordo com seu diâmetro. A aplicação do adubo nitrogenado foi parcelada 20 e 40 dias após a emergência das plântulas (DAE).

A umidade do solo foi controlada diariamente por meio de pesagem dos vasos e reposição da água evapotranspirada até 180 g kg^{-1} . Foram cultivadas duas plantas por vaso, cortadas aos 60 DAE. Foram determinados os teores de nitrato (N-NO_3^-) (Keeney & Nelson, 1982), de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) trocáveis (Raij & Quaggio, 1983), e de sulfato (S-SO_4^{2-}) (Cantarella & Prochnow, 2001), do solo de cada camada dos vasos, correspondendo às profundidades de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–50 cm.

O experimento fatorial 3 x 4 foi disposto em blocos ao acaso, com quatro repetições. Foram feitas análises de variância para cada camada do perfil do solo avaliado, e, por meio do teste t a 5 %, determinaram-se as diferenças mínimas significativas entre as médias dos teores de cálcio, magnésio, potássio, nitrato e sulfato, para as diferentes doses de adubação nitrogenada de cobertura dentro de cada condição de calagem (calcário superficial, calcário incorporado e sem correção do solo). Fez-se, também, um estudo de correlação linear para pares iônicos nas diferentes profundidades do solo, e os coeficientes de correlação também foram testadas a 5 %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As doses de sulfato de amônio aplicadas em cobertura no algodão proporcionaram aumentos expressivos na lixiviação de SO_4^{2-} no perfil, independentemente da correção da acidez do solo (Figura 1a). De acordo com Camargo & Raij (1989), em solos ácidos, com predomínio de cargas variáveis, quando os valores de pH são baixos, a carga líquida, quando negativa, é baixa, podendo até ser positiva nos colóides, o que aumenta a adsorção de ânions no perfil, reduzindo as perdas por lixiviação. No trabalho de

Dynia & Camargo (1995), foi constatado que a calagem incorporada intensificou a lixiviação de SO_4^{2-} no solo. No entanto, no presente estudo, embora a dose mais elevada de sulfato de amônio (150 kg ha^{-1} de N) tenha favorecido a lixiviação de SO_4^{2-} a 50 cm de profundidade na condição de calagem incorporada (Figura 1a), os resultados obtidos não permitem concluir, de maneira estatisticamente conclusiva, que o modo de aplicação de calcário exerceu influência sobre a movimentação de SO_4^{2-} no solo.

As concentrações de NO_3^- ao longo do perfil do solo foram incrementadas com o aumento das doses de adubação de cobertura e sofreram forte variação de acordo com a forma de aplicação de calcário (Figura 1b). A calagem incorporada aumentou consideravelmente a oferta de NO_3^- na camada arável do solo (0–20 cm de profundidade), principalmente quando comparada ao tratamento sem adição de corretivo. No trabalho de Silva & Vale (2000), com cinco tipos de solo, constatou-se que a adubação com sulfato de amônio favoreceu a formação de NO_3^- com muito mais intensidade na presença de calagem. Segundo Moreira & Siqueira (2002), a atividade das bactérias nitrificadoras é intensamente influenciada pela acidez do solo, sendo muito reduzida em condições de pH inferior a 6,0. No que diz respeito à lixiviação, apesar de a calagem incorporada ter propiciado aumento nos teores de NO_3^- até 30 cm de profundidade no solo, quando foram adicionadas as maiores doses de sulfato de amônio em cobertura (100 e 150 kg ha^{-1} de N), a forma de aplicação do corretivo não incrementou a lixiviação deste ânion a 50 cm de profundidade, que foi intensificada pela adubação nitrogenada mesmo na ausência de calagem (Figura 1b).

As concentrações de Ca^{2+} abaixo de 20 cm de profundidade do solo foram aumentadas pela adubação de cobertura com sulfato de amônio somente quando o calcário foi incorporado (Figura 2a). Quando o calcário foi aplicado superficialmente, a adubação nitrogenada alterou as concentrações de Ca^{2+} apenas nos primeiros 10 cm de profundidade. No trabalho de Petrere & Anghinoni (2001), a aplicação superficial de 6 t ha^{-1} de calcário em um solo manejado no sistema de semeadura direta elevou os níveis de Ca trocável até à profundidade de 17,5 cm no perfil, e, quando o calcário foi incorporado com arado e grade (0–20 cm de profundidade de revolvimento), os teores de Ca^{2+} foram aumentados até 22,5 cm de profundidade. No presente experimento, na condição de calagem incorporada, misturou-se ao solo uma quantidade de corretivo equivalente a 5 t ha^{-1} na profundidade de 0–20 cm, para elevar a saturação por bases a 60 % (Quaggio & Raij, 1996), e, nesta condição, a adubação nitrogenada de cobertura elevou os teores de Ca trocável até 50 cm de profundidade (Figura 2a).

A lixiviação de Mg^{2+} foi expressiva ao longo do perfil do solo com a aplicação de sulfato de amônio em cobertura no algodão, em todas as condições de

calagem, até mesmo na ausência de aplicação do corretivo (Figura 2b). A maior movimentação descendente de Mg^{2+} no solo, em comparação ao Ca^{2+} , pode ser explicada, segundo Raij (1991), pela energia de ligação existente entre as bases trocáveis e os colóides do solo, que segue a seguinte ordem: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Ou seja, conforme o número de valência e o tamanho dos íons hidratados, as bases do solo são adsorvidas com maior ou menor energia de ligação, o que se denomina série liotrópica. Sendo assim, de acordo com o autor supracitado, em solos bem drenados, a lixiviação de Mg^{2+} é naturalmente maior do que a de Ca^{2+} , considerando a maior energia de adsorção deste último cátion nos colóides do solo. Nos trabalhos de Caires et al. (1999) e Caires et al. (2003), a lixiviação de Mg trocável ao longo do perfil do solo, de maneira geral, foi bem mais expressiva do que a do Ca trocável, independentemente do modo de aplicação de calcário, dos tratamentos referentes ao gesso agrícola e das condições de estudo, evidenciando que o cátion bivalente Mg^{2+} movimentou-se, preferencialmente, de acordo com a teoria da série liotrópica.

As variações nas concentrações de K^+ do solo do presente trabalho foram decorrentes da adubação nitrogenada de cobertura no algodão, bem como das formas de aplicação de calcário (Figura 2c). Contudo, em termos de significância estatística, as diferentes doses de sulfato de amônio aplicadas dentro de cada condição de calagem (incorporada, superficial e sem corretivo) mostraram pouca influência sobre a lixiviação de K^+ no perfil do solo. Esperava-se uma maior movimentação descendente de K, pois, de acordo com os modelos de energia de adsorção de cátions aos colóides do solo, o K teria de ser lixiviado preferencialmente em relação ao Mg (Figura 2b e 2c). É necessário considerar também que a adubação potássica do presente estudo foi relativamente elevada, da ordem de 120 mg dm^{-3} de K, o que pode ter influenciado os resultados pouco coerentes de lixiviação deste cátion monovalente.

Segundo Vitti et al. (1986), as solubilidades em água, a 20–25 °C, do gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), do carbonato de cálcio (CaCO_3) e do sulfato de amônio [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] são de $2,04 \text{ g L}^{-1}$, $0,014 \text{ g L}^{-1}$ e 754 g L^{-1} , respectivamente. Portanto, a capacidade de dissolução do adubo sulfato de amônio é, muitas vezes, superior à do gesso agrícola e à do calcário, o que confere a este fertilizante nitrogenado, comumente utilizado na agricultura brasileira, uma capacidade bastante expressiva de fornecer ânions SO_4^{2-} ao solo, considerando ainda o potencial de formação de ânions NO_3^- resultante da nitrificação do NH_4^+ aplicado. Segundo Alvarez V. et al. (1999), a recomendação de gesso agrícola, de acordo com a textura do solo, para correção de camadas subsuperficiais com 20 cm de espessura, é, em média, de 600 kg ha^{-1} de gesso para solos com teores de argila variando de 150 a 350 g kg^{-1} , o que corresponde à adição de 335 kg ha^{-1} de ânions SO_4^{2-} .

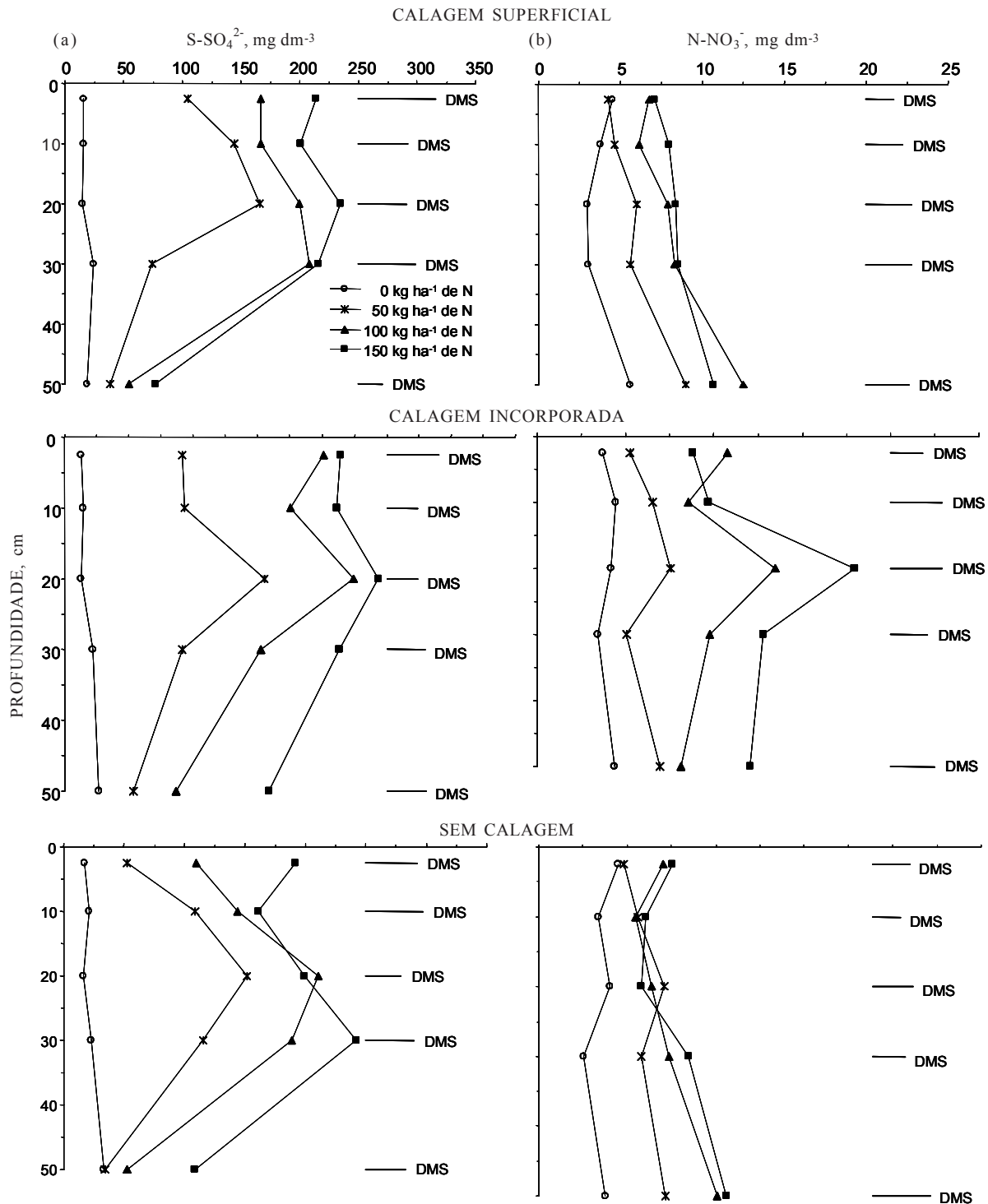


Figura 1. Concentrações de sulfato (a) e nitrato (b) ao longo do perfil do solo, em função das doses de N aplicadas em cobertura, nas condições de calagem superficial, calagem incorporada e sem calagem. DMS: diferença mínima significativa pelo teste t a 5%.

No presente experimento, considerando a adubação de cobertura do algodão equivalente a 100 kg ha⁻¹ de N com o sulfato de amônio, adicionou-se ao solo, com teor de argila de 280 g kg⁻¹, uma quantidade de SO₄²⁻ da ordem de 343 kg ha⁻¹. Portanto, a quantidade

de gesso que seria recomendada por Alvarez V. et al. (1999), para o solo utilizado no presente estudo, é compatível, em termos de adição de ânions SO₄²⁻, à adubação de cobertura com 100 kg ha⁻¹ de N com a fonte sulfato de amônio.

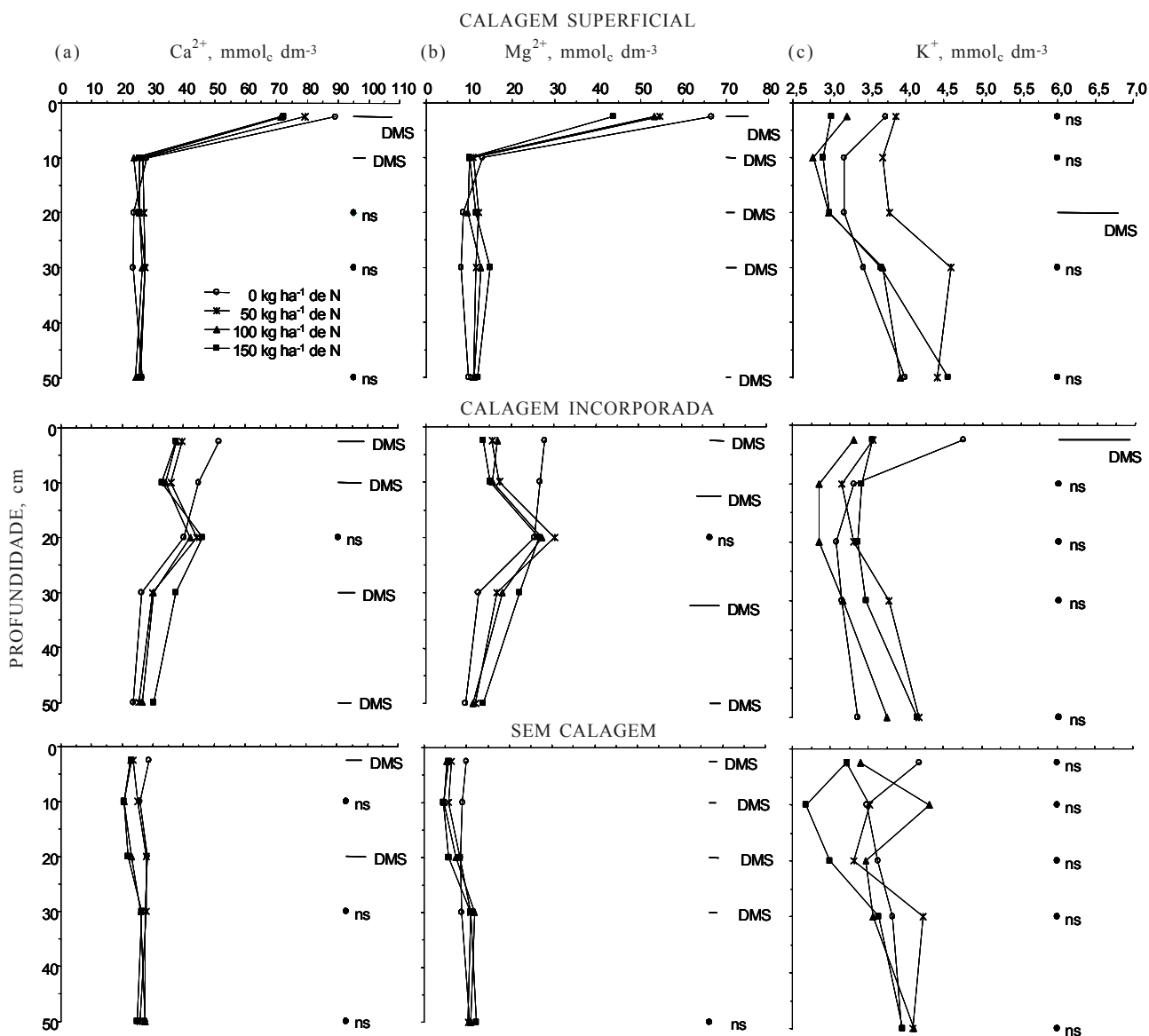


Figura 2. Teores de cálcio (a), magnésio (b) e potássio (c) trocáveis ao longo do perfil do solo, em função das doses de N aplicadas em cobertura, nas condições de calagem superficial, calagem incorporada e sem calagem. DMS: diferença mínima significativa pelo teste t a 5 %. ns: não-significativo.

No quadro 1, estão apresentados os coeficientes de correlação linear calculados para pares de íons das diferentes camadas do perfil do solo. Nas camadas mais superficiais do perfil (0–5 e 5–10 cm de profundidade), em todas as condições de calagem estudadas, verifica-se que os coeficientes significativos foram negativos, o que indica que, à medida que as concentrações dos ânions SO_4^{2-} e NO_3^- foram aumentadas, houve redução nos teores dos cátions trocáveis Ca e Mg. Portanto, a movimentação descendente das bases Ca^{2+} e Mg^{2+} contidas nos primeiros 10 cm do solo foi influenciada pelo aumento das concentrações de SO_4^{2-} e NO_3^- , guardadas as proporções para as diferentes condições de calagem. Em contrapartida, nas camadas mais profundas do

perfil (20–30 e 30–50 cm de profundidade), com exceção da correlação entre NO_3^- e Ca^{2+} na profundidade de 30–50 cm para a condição de calagem superficial (Quadro 1), todos os outros coeficientes significativos foram positivos, em todas as condições de calagem, mostrando que as concentrações das bases trocáveis Ca e Mg foram aumentadas nas camadas mais profundas do perfil do solo, à medida que os teores dos ânions SO_4^{2-} e NO_3^- também foram incrementados, confirmando o potencial do sulfato de amônio em promover a translocação de bases para o subsolo.

As concentrações de Ca^{2+} nas diferentes camadas do solo praticamente não apresentaram correlações com as de SO_4^{2-} e NO_3^- nas condições de calagem superficial e na ausência de aplicação do corretivo

Quadro 1. Coeficientes de correlação linear entre pares de íons das diferentes camadas do perfil do solo, nas condições de calagem superficial, calagem incorporada e sem calagem, considerando todas as doses de N aplicadas em cobertura

Profundidade		Calagem superficial		Calagem incorporada		Sem calagem	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
cm							
0–5	N-NO ₃ ⁻	- 0,51*	- 0,60*	- 0,52*	- 0,48 ^{ns}	- 0,48 ^{ns}	- 0,59*
	S-SO ₄ ²⁻	- 0,48 ^{ns}	- 0,79***	- 0,62**	- 0,64**	- 0,23 ^{ns}	- 0,46 ^{ns}
5–10	N-NO ₃ ⁻	- 0,10 ^{ns}	- 0,36 ^{ns}	- 0,68**	- 0,61*	- 0,50*	- 0,61*
	S-SO ₄ ²⁻	- 0,03 ^{ns}	- 0,40 ^{ns}	- 0,63**	- 0,62*	- 0,24 ^{ns}	- 0,63**
10–20	N-NO ₃ ⁻	- 0,12 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,22 ^{ns}	- 0,14 ^{ns}	- 0,35 ^{ns}	- 0,31 ^{ns}
	S-SO ₄ ²⁻	0,20 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,25 ^{ns}	- 0,22 ^{ns}	- 0,29 ^{ns}
20–30	N-NO ₃ ⁻	0,11 ^{ns}	0,62*	0,55*	0,85***	- 0,01 ^{ns}	0,57*
	S-SO ₄ ²⁻	0,29 ^{ns}	0,72**	0,61*	0,91***	- 0,11 ^{ns}	0,47 ^{ns}
30–50	N-NO ₃ ⁻	- 0,56*	0,32 ^{ns}	0,54*	0,64**	- 0,36 ^{ns}	- 0,05 ^{ns}
	S-SO ₄ ²⁻	- 0,10 ^{ns}	0,68**	0,79***	0,69***	0,23 ^{ns}	0,63**

*, ** e *** significativos a 5, 1 e 0,1 % pelo teste t, respectivamente. ns: não-significativo.

(Quadro 1). Por outro lado, com a calagem incorporada, com exceção da camada de 10–20 cm de profundidade, ocorreram correlações significativas entre as concentrações de NO₃⁻ e SO₄²⁻ e as de Ca²⁺ ao longo de todo o perfil do solo. Estes resultados evidenciam que a incorporação do corretivo apresentou forte influência sobre a translocação de Ca²⁺ no solo, intensificada pela cobertura com sulfato de amônio. No que diz respeito ao Mg²⁺, em praticamente todas as condições de calagem (até mesmo na ausência de corretivo), foram constatadas correlações significativas entre as concentrações deste cátion básico e as dos ânions NO₃⁻ e SO₄²⁻, mostrando a maior susceptibilidade à lixiviação do Mg²⁺ em comparação ao Ca²⁺, tal como relata Raji (1991).

Abaixo de 30 cm de profundidade no perfil do solo, de maneira geral, os coeficientes de correlação linear atingiram níveis de significância bem mais expressivos, quando as concentrações de Ca²⁺ e Mg²⁺ foram relacionadas com as de SO₄²⁻, em comparação ao NO₃⁻, na formação de pares iônicos (Quadro 1). Estes resultados evidenciam a maior afinidade química do ânion SO₄²⁻ em se associar com os cátions básicos bivalentes do solo, a qual pode ser justificada, dentre outros fatores, pelas concentrações relativamente maiores de SO₄²⁻ no solo em resposta à adubação com sulfato de amônio pelo fato de este ânion praticamente não ter sofrido influência das diferentes condições de calagem estudadas, ao contrário do NO₃⁻ (Figura 1).

Os resultados apresentados indicam o potencial da adubação nitrogenada de cobertura com sulfato de

amônio em intensificar a lixiviação de Ca e Mg trocáveis em profundidade. Sendo assim, ressalta-se a importância dos ânions SO₄²⁻ e NO₃⁻ incrementados via adubação, principalmente no caso de fertilizantes com alta solubilidade em água como o sulfato de amônio, não somente em termos de nutrição das plantas cultivadas, mas também no que diz respeito à formação de pares iônicos com cátions básicos do solo, a fim de melhorar a fertilidade do subsolo, propiciando o enraizamento profundo das culturas.

CONCLUSÕES

1. A cobertura com sulfato de amônio causou forte lixiviação de SO₄²⁻ no perfil, independentemente da correção da acidez do solo, enquanto a forma de aplicação de calcário praticamente não exerceu influência sobre a translocação de SO₄²⁻ em profundidade.

2. A calagem incorporada aumentou a disponibilização de NO₃⁻ na camada arável do solo, mas não aumentou a sua lixiviação, que ocorreu de acordo com a adubação nitrogenada mesmo no solo não corrigido.

3. A adubação de cobertura com sulfato de amônio aumentou a movimentação descendente de Ca²⁺ abaixo da camada arável do solo somente na condição de calagem incorporada.

4. O Mg^{2+} apresentou lixiviação expressiva no perfil do solo induzida pela adubação nitrogenada de cobertura, tanto nas condições de calagem superficial e incorporada, como na ausência de correção da acidez do solo.

5. Abaixo de 30 cm de profundidade no perfil do solo, o ânion SO_4^{2-} apresentou maior afinidade do que o NO_3^- na formação de pares iônicos com os cátions trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} , nas diferentes condições de calagem.

LITERATURA CITADA

- ADAMS, F. & MARTIN, J.B. Liming effects on nitrogen use and efficiency. In: HAUCK, R.D., ed. Nitrogen in crop production. Madison, American Society of Agronomy, 1984. p.417-426.
- ALVAREZ V., V.H.; DIAS, L.E.; RIBEIRO, A.C. & SOUZA, R.B. Uso de gesso agrícola. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.67-78.
- 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, 1998. p.27-52.
- CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. & KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 27:275-286, 2003.
- 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, O.A. & RAIJ, B. van. Movimento do gesso em amostras de latossolos com diferentes propriedades eletroquímicas. R. Bras. Ci. Solo, 13:275-280, 1989.
- CANTARELLA, H. & PROCHNOW, L.I. Determinação de sulfato em solos. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. ; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A., eds. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. p.225-230.
- CARVALHO, W.A.; ESPINDOLA, C.R. & PACCOLA, A.A. Levantamento de solos da Fazenda Experimental "Presidente Médici". Botucatu, Universidade Estadual de São Paulo, 1983. 95p.
- DYNIA, J.F. & CAMARGO, O.A. Adsorção e movimento de sulfato em latossolo de cerrado submetido a calagem e adubação fosfatada. R. Bras. Ci. Solo, 19:249-253, 1995.
- 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.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- KEENEY, D.R. & NELSON, D.W. Nitrogen: inorganic forms. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. Part 2, p.625-642.
- MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e bioquímica do solo. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2002. 626p.
- OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B. & BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.393-486.
- PAVAN, M.A. & ROTH, C.H. Effect of lime and gypsum on chemical composition of runoff and leachate from samples of Brazilian Oxisol. Ci. Cult., 44:391-394, 1992.
- PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminium following lime or gypsum application to a Brazilian oxisol. Soil Sci. Soc. Am. J., 48:33-38, 1984.
- 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.
- PETREIRE, C. & ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. R. Bras. Ci. Solo, 25:885-895, 2001.
- QUAGGIO, J.A. & RAIJ, B. van. Correção da acidez do solo. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas & Fundação IAC, 1996. p.14-19. (Boletim técnico, 100)
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análises de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 31p. (Boletim técnico, 81)
- RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, Ceres, Potafos, 1991. 343p.
- RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. & CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in brazilian savannah Oxisol. Agron. J., 72:40-44, 1980.
- SILVA, C.A. & VALE, F.B. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. Pesq. Agropec. Bras., 35:2461-2471, 2000.
- SOUZA, D.M.G. & RITCHEY, K.D. Uso de gesso no solo de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1.; Brasília, 1985. Anais. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1986. p.119-144.
- VITTI, G.C.; FERREIRA, M.E. & MALAVOLTA, E. Respostas de culturas anuais e perenes ao fosfogesso. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1.; Brasília, 1985. Anais. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1986. p.17-44.