

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM AGRONOMIA**

**GESSO AGRÍCOLA E ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO EM
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

RENATO ZARDO FILHO

**PONTA GROSSA – PR
2011**

RENATO ZARDO FILHO

GESSO AGRÍCOLA E ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO EM
SISTEMA PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada à Universidade
Estadual de Ponta Grossa para obtenção do
título de Mestre em Agronomia - Área de
Concentração: Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Co-orientador: Dr. Gabriel Barth

PONTA GROSSA – PR
2011

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

Z36g Zardo Filho, Renato
 Gesso agrícola e adubação nitrogenada na cultura do milho em sistema de
 plantio direto / Renato Zardo Filho. Ponta Grossa, 2011.
 134 f.

 Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de Concentração :
 Fitopatologia) , Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Orientador : Prof. Dr. Eduardo Favero Caires
 Co-orientador : Prof. Dr. Gabriel Barth

 1.Zea mayz, L. 2. Eficiência. 3. Nitrato. 4. Fosfogesso. 5. Subsolo ácido.
 6. Lixiviação. I. Caires, Eduardo Favero. II. Barth, Gabriel. III.T.

CDD: 632



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“GESSO AGRÍCOLA E ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO”.**

Nome: Renato Zardo Filho

Orientador: Eduardo Fávero Caires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Dr. Antonio Costa

Prof. Dr. Fernando José Garbuio

Data da Realização: 10 de novembro de 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente às pessoas e instituições sem as quais esse trabalho não seria realizado.

À Deus, Nsra. Aparecida pelas bênçãos, iluminações e, principalmente, pelas pessoas colocadas no meu caminho.

Aos meus pais, Renato e Soraia, e irmãos, Amensis e Danilo, pela compreensão em todos os momentos, pelo amor incondicional.

Em especial a minha mãe Soraia, pelo constante e incondicional apoio, amizade, fé e disposição para tornar possível todas as conquistas ao longo de minha vida.

À minha noiva Danielle, pela amizade, compreensão, ajuda nas atividades, companheirismo e por tudo que ainda teremos pela frente.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao amigo e professor Dr. Eduardo Fávero Caires, pela paciência, disposição, confiança, sábios conselhos e excelente orientação durante a realização deste trabalho, sem o qual não teria sido possível a realização desta dissertação, e também por estar sempre disposto a fazer o possível para uma melhor formação.

Ao Dr. Gabriel Barth, pela co-orientação desta dissertação, e aos funcionários da Fundação ABC, pela disponibilidade e grande ajuda nas atividades de campo.

À minha tia Ana Duarte Lenotti, pela correção ortográfica do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela dedicação, e ao professor Dr. Adriel Ferreira da Fonseca, por todo apoio na realização das análises de nutrição mineral.

Aos amigos e colegas de trabalho dos Laboratórios de Fertilidade do Solo e de Nutrição de Plantas: Hélio Antônio Wood Joris, Adriano Haliski, Angelo Rafael Bini, Danilo Augusto Scharr, Bruno Lourenço, Raiane Rodrigues França, Digiane Ribas Gomes, Clélio Gilberto Marsola Júnior, Leonardo Fetzner, Pedro Henrique Perez, Valter Yassuo Asami, Hendrik Reifur, Jéssica Alves dos Santos, Rodrigo Martins e Shiville Los Galetto, pela participação fundamental na concretização deste trabalho, além da enorme amizade e companheirismo. Aos amigos Julius Blum, Susana Churka, Fernando José Garbuio e Evandro Maschietto, pela grande amizade e ajuda.

Aos funcionários da UEPG, em especial às amigas Dirce Vaz e Verônica Carneiro, pela grande ajuda nas análises laboratoriais.

Ao professor Dr. João Carlos de Moraes Sá e ao colega Clever Briedis, pela ajuda na realização das análises de nitrogênio.

À todos que de uma forma ou de outra, contribuíram com a realização deste trabalho e com a formação do autor, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Grande parte do nitrogênio (N) aplicado na cultura do milho não é absorvido devido à restrição no desenvolvimento do sistema radicular decorrente da acidez no subsolo. O gesso agrícola, por ter capacidade de melhorar o ambiente para o crescimento das raízes, pode aumentar a eficiência da absorção de N pelas plantas e a produtividade de grãos de milho. Com o objetivo de avaliar os efeitos da aplicação de gesso e de N em cobertura nos atributos químicos do solo, no crescimento de raízes, na nutrição mineral e na performance do milho cultivado em sistema plantio direto, foram realizados dois experimentos, sendo um no campo e outro em colunas indeformadas de solo, em um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa da região Centro-Sul do Paraná. No experimento de campo, quatro doses de gesso (0, 5, 10 e 15 t ha⁻¹) e três de N-NH₄NO₃ em cobertura (60, 120 e 180 kg ha⁻¹) foram combinadas em esquema fatorial 4 × 3, com três repetições. No experimento em colunas de solo, foram utilizadas duas doses de gesso (0 e 10 t ha⁻¹) e duas doses de N-NH₄NO₃ (0 e 180 kg ha⁻¹), em esquema fatorial 2 × 2, com cinco repetições. Nos dois experimentos, o gesso foi aplicado em superfície, uma semana antes da semeadura, e foram empregados 45 kg ha⁻¹ de N na semeadura. Nos dois experimentos foram avaliadas as alterações nos atributos químicos do solo, no crescimento radicular e na absorção de nutrientes pelas plantas. A produtividade de grãos e a eficiência no uso do N foram avaliadas no experimento de campo, e a quantidade de N-NO₃⁻ lixiviada aos 45 dias após a aplicação de gesso, no momento do corte das plantas, foi avaliada no experimento em colunas de solo. No campo, a aplicação de gesso elevou os teores de Ca²⁺, S-SO₄²⁻ e P no solo, e reduziu a saturação por Al³⁺ nas camadas do subsolo. As doses de N em cobertura aumentaram o teor de N-NO₃⁻ ao longo do perfil do solo e o teor de Ca²⁺ na camada de 0,4-0,6 m. O aumento na disponibilidade de Ca²⁺ e de S-SO₄²⁻ no perfil do solo, bem como a redução na saturação por Al³⁺ no subsolo, com a adição de gesso, favoreceram o crescimento radicular do milho, a extração de N, P, K, Ca, S, Zn e Mn pelas plantas e a produtividade de grãos. Além disso, as doses de gesso melhoraram a eficiência no uso do N pelo milho. No estudo em colunas de solo, a aplicação de gesso e de N melhoraram o crescimento das raízes em profundidade. O maior crescimento radicular resultou em maior produção de matéria seca da parte aérea e maior extração de N, P, K, Ca, Mg e S pelas plantas. A quantidade de N-NO₃⁻ lixiviada nas colunas de solo foi maior com a aplicação de N na ausência de gesso. A aplicação de gesso aumentou a absorção de N pelas plantas, proveniente da adubação nitrogenada, em decorrência de aumento no crescimento radicular e no teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo, reduzindo, com isso, a quantidade de N-NO₃⁻ lixiviada. Os resultados mostraram que o uso de gesso minimiza as perdas de N-NO₃⁻ por lixiviação por aumentar a absorção de N pelas plantas, ocasionando melhoria na eficiência da adubação nitrogenada e contribuindo para o aumento da sustentabilidade da produção de milho.

Palavras-chave: *Zea mays*, L.; eficiência; nitrato; fosfogesso; subsolo ácido; lixiviação.

ABSTRACT

A considerably part of the high nitrogen (N) rates applied in corn is not absorbed due root growth restriction by subsoil acidity. Gypsum is able to improve conditions for root growth and lead to greater N uptake efficiency, increasing corn yield. Thus to evaluate the effect of gypsum and N on top dressing on soil chemical attributes, root growth, mineral nutrition and corn development under no-tillage system, two experiments were carried out on a dystrophic clayey Typic Hapludox at Middle-South of Paraná State, being one field and another in undisturbed soil columns. In the field experiment, four rates of gypsum (0, 5, 10 and 15 t ha⁻¹) and three rates of N-NH₄NO₃ (60, 120 and 180 kg ha⁻¹) were set up into 4 × 3 factorial design with three replications. On soil columns, two gypsum rates (0 and 10 t ha⁻¹) and two rates of N-NH₄NO₃ (0 and 180 kg ha⁻¹) were used in a 2 × 2 factorial design with five replicates. In both experiments, gypsum was applied on the surface, one week before sowing and 45 kg N ha⁻¹ was applied at sowing. Were analyzed the changes in chemical soil properties, root development, nutrient uptake by corn in both experiments. On the field experiment were quantified the yield and efficiency in N use, and on the columns experiment the amount of N-NO₃⁻ leaching was determined 45 days after the application of gypsum when the plants were cut off. On field experiment, gypsum increased levels of Ca²⁺, S-SO₄²⁻ and P also decreased the exchangeable Al³⁺ level on subsoil layers. N rates raised up N-NO₃⁻ levels throughout the soil profile and Ca²⁺ in 0,4-0,6 m. The increase in Ca²⁺ and S-SO₄²⁻ levels on soil profile, as well the decrease on Al³⁺ saturation by gypsum application, improved plant root growth, and increased N, P, K, Ca, S, Zn and Mn extraction by maize, leading in increased corn grain yield. On top of that, gypsum rates improved N use efficiency by corn. In the soil columns experiment, gypsum and N application improved the plants roots to higher depths, which results in better plants dry matter and greater N, P, K, Ca, Mg, and S extraction. The amount of N-NO₃⁻ leached on soil columns was higher when N was applied without gypsum. Gypsum application increased N uptake by plants due the root system increase and also increased of S-SO₄²⁻ supply in soil, thus reducing the amount of N-NO₃⁻ in the soil and leached. This results showed that gypsum use reduce losses of N-NO₃⁻ leached by increasing N plants uptake, having as a result better N use efficiency contributing to higher corn yield sustainability.

Key words: *Zea mayz*, L.; efficiency; nitrate; phosphogypsum; subsoil acidity; leaching

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Consumo global de fertilizantes nitrogenado ao longo dos anos. (FAO, 2004).....	15
Figura 2. Evolução no consumo de nitrogênio no Brasil no período de 1950 a 2004. (LOPES; BASTOS e DAHER, 2007).....	16
Figura 3. Localização geográfica do município de Tibagi (esfera em verde), dentro do contexto estadual e nacional.....	37
Figura 4. Dados climáticos de Tibagi, PR. Precipitação pluvial média mensal da região (10 anos), precipitação pluvial mensal ocorrida durante a realização do experimento (setembro/2009 a fevereiro/2010) e temperaturas médias máximas e mínimas ocorridas no mesmo período (FUNDAÇÃO ABC, 2011).	38
Figura 5. Coleta de amostras indeformadas realizadas na área experimental, através do uso de uma rosca hidráulica.....	42
Figura 6. Colunas de solo em ambiente protegido.....	43
Figura 7. Alterações nos teores de Ca^{2+} trocável do solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativos, $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	49
Figura 8. Alterações nos teores de Mg^{2+} trocável do solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativos, $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	50
Figura 9. Alterações nos teores de K^+ trocável do solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)	51
Figura 10. Alterações na relação Ca/Mg do solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	54
Figura 11. Alterações na Saturação por Alumínio no solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativo $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	56
Figura 12. Alterações nos teores de P (Mehlich 1) no solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	57
Figura 13. Alterações nos teores de N-NO_3^- no solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	58
Figura 14. Alterações nos teores de S-SO_4^{2-} no solo extraído com solução fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (CaH_2PO_4) ₂ , em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).....	61

Figura 15.	Alterações nos teores de $S-SO_4^{2-}$ no solo extraído com solução de acetato de amônio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em ácido acético $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ (NH_4OAc), em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).....	62
Figura 16.	Correlação entre os teores de sulfato no solo (0,0-0,6 m) extraídos com solução de fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ $Ca(H_2PO_4)_2$ e solução de acetato de amônio $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ em ácido acético $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ (NH_4OAc). **: $P < 0,01$	65
Figura 17.	Alterações nos teores de Pb no solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	66
Figura 18.	Alterações nos teores de Cu no solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	67
Figura 19.	Alterações nos teores de Mn no solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	68
Figura 20.	Alterações nos teores de Zn no solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativo a $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	69
Figura 21.	Alterações nos teores de Fe no solo em diferentes profundidades, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	71
Figura 22.	Densidade de comprimento de raízes de milho em função da aplicação superficial de gesso (15 t ha^{-1}), considerando as doses de 60, 120 e 180 kg ha^{-1} de nitrogênio. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). ns: não-significativo, *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$	73
Figura 23.	Comprimento radicular do milho por área, até a profundidade de 0,6 m, em função da aplicação superficial de gesso (15 t ha^{-1}), considerando as doses de 60, 120 e 180 kg ha^{-1} de nitrogênio. Letras iguais, maiúsculas para as doses de N e minúsculas para a aplicação de gesso, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).....	73
Figura 24.	Correlações entre o comprimento de raízes de milho por área até a profundidade de 0,6 m, e os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no perfil do solo (0,0-0,6 m). **: $P < 0,01$	76
Figura 25.	Alterações na leitura de Clorofila nas folhas de milho, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativo $P < 0,01$. Letras iguais não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	77
Figura 26.	Alterações na área da folha-índice de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).....	78
Figura 27.	Concentração de N na área da folha-índice de milho, em função de doses de gesso aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$	81

Figura 28.	Produção de matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).....	81
Figura 29.	Extração de N, P, K pelo milho, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativo a $P < 0,01$. Letras iguais não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	83
Figura 30.	Extração de S, Ca, Mg pelo milho, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativo a $P < 0,01$. Letras iguais não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	85
Figura 31.	Extração de Cu, Zn, Mn e Fe pelo milho, em função de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicados na superfície. **: significativo a $P < 0,01$. Letras iguais não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	87
Figura 32.	Exportação de N, P, K pelo milho, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativo a $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	91
Figura 33.	Exportação de S, Ca, Mg pelo milho, em função das doses de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: significativo a $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	92
Figura 34.	34. Exportação de Cu, Zn, Mn e Fe pelo milho, em função de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicados na superfície. * e **: significativo a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	93
Figura 35.	Produtividade de grãos de milho em função das doses de gesso (a) e N (b) aplicadas na superfície **: significativo a $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)..	94
Figura 36.	Número de grãos por espiga e massa de mil grãos, em função de gesso (a) e nitrogênio (b) aplicados na superfície. **: significativo a $P < 0,01$, respectivamente. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	96
Figura 37.	Eficiência agrônômica (EA), eficiência fisiológica (EF) e eficiência agrofisiológica (EAF), considerando as doses de gesso e de nitrogênio aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).....	97
Figura 38.	Eficiência na recuperação aparente (ERA), fator parcial de produtividade do N (FPP_N) e eficiência de uso do N (EUN), considerando as doses de gesso e de nitrogênio aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).....	99
Figura 39.	Densidade de comprimento de raízes de milho, em função da aplicação de nitrogênio (a) e de gesso (b) nas colunas de solo. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). ns: não-significativo, *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$	111
Figura 40.	Percentual do comprimento de raízes de milho no perfil do solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio nas colunas de solo. DMS = diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).....	112
Figura 41.	Comprimento radicular do milho cultivado em colunas, em função da presença de N e gesso, Letras iguais maiúsculas para as doses de N, e minúsculas para a aplicação de gesso, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).....	113

Figura 42.	Relações entre o teor de N-NO_3^- no solo, nas profundidades de 0,3-0,4 m (a), e 0,4-0,5m (b), e a quantidade de N absorvida pelo milho cultivado nas colunas de solo. **: $P < 0,01$	118
Figura 43.	Relação entre o teor de N-NO_3^- quantificado nos coletores e a quantidade de N absorvida pelo milho cultivado nas colunas de solo. **: $P < 0,01$	120

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1.	Análises químicas e granulométricas do solo..... 36
Tabela 2.	Equações de regressão ajustadas para pH (CaCl_2 0,01mol L^{-1}), acidez potencial (H + Al) e acidez trocável (Al), em diferentes profundidades do solo, considerando as doses de gesso aplicadas em superfície..... 47
Tabela 3.	Efeito de doses de nitrogênio (N) aplicadas em cobertura no pH (CaCl_2 0,01mol L^{-1}), na acidez potencial (H + Al) e na acidez trocável (Al), em diferentes profundidades do solo..... 47
Tabela 4.	Coefficientes de correlação linear entre a densidade de comprimento de raízes de milho e os atributos químicos do solo, em função da profundidade..... 74
Tabela 5.	Coefficientes de correlação linear entre o comprimento radicular do milho por área, até a profundidade de 0,60 m, e os atributos químicos do solo..... 74
Tabela 6.	Concentrações de nutrientes nas folhas de milho influenciadas pelas doses de gesso e de nitrogênio em cobertura..... 78
Tabela 7.	Coefficientes de correlação linear entre a produção de matéria seca da parte aérea do milho e os atributos químicos do solo, em função da profundidade. 82
Tabela 8.	Coefficientes de correlação linear entre a extração de nutrientes pelas plantas e o crescimento radicular do milho, em função da profundidade..... 88
Tabela 9.	Concentrações de nutrientes nos grãos de milho influenciadas pelas doses de gesso e de nitrogênio em cobertura..... 88
Tabela 10.	Valores de pH em CaCl_2 do solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo..... 102
Tabela 11.	Acidez potencial (H+Al) do solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo. 103
Tabela 12.	Acidez trocável (Al^{3+} trocável) do solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo..... 103
Tabela 13.	Teores de Ca^{2+} trocável no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo..... 104
Tabela 14.	Teores de Mg^{2+} trocável no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo..... 105
Tabela 15.	Relação Ca/Mg no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo..... 106
Tabela 16.	Teores de K^+ trocável no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo..... 106
Tabela 17.	Saturação por Al^{3+} no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo..... 107
Tabela 18.	Teores de P (Mehlich 1) no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo..... 108

Tabela 19.	Teores de N-NO_3^- no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.....	109
Tabela 20.	Teores de S-SO_4^{2-} (NH_4OAc) ₂ no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.....	110
Tabela 21.	Raio médio de raízes de milho, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.....	114
Tabela 22.	Coeficientes de correlação linear entre a densidade de comprimento de raízes de milho e os atributos químicos do solo, em função da profundidade.....	114
Tabela 23.	Coeficientes de correlação linear entre o comprimento de raízes por área, até a profundidade de 0,5 m, e os atributos químicos do solo.....	115
Tabela 24.	Produção de matéria seca da parte aérea do milho, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.....	115
Tabela 25.	Coeficientes de correlação linear entre a produção de matéria seca da parte aérea do milho cultivado em colunas de solo e os atributos químicos do solo, em função da profundidade.....	116
Tabela 26.	Extração de nutrientes pela parte aérea do milho, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.....	117
Tabela 27.	Volume de extrato lixiviado e teores de nutrientes nos coletores, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.....	119

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 NITROGÊNIO.....	14
2.1.1 Adubação Nitrogenada.....	14
2.1.2 Perdas de Nitrogênio: impactos ambientais e econômicos.....	16
2.1.3 Nitrogênio no Solo.....	17
2.1.4 Lixiviação de Nitrato.....	19
2.1.5 Eficiência da Utilização do Nitrogênio.....	22
2.2 GESSO AGRÍCOLA.....	25
2.2.1 Efeito da Aplicação de Gesso Agrícola no Solo.....	27
2.2.2. Efeito da Aplicação de Gesso Agrícola nas Cultura.....	30
2.2.3 Interação N x S.....	32
2.3 CULTURA DO MILHO.....	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	36
3.1.1. Experimento em Campo.....	36
3.1.1.1 Delineamento experimental	37
3.1.1.2 Cultura do Milho.....	37
3.1.1.3 Condições Climáticas Durante o Cultivo do milho.....	38
3.1.1.4 Avaliações	39
3.1.1.4.1 Análises Químicas do Solo.....	39
3.1.1.4.2 Avaliações na Cultura do Milho.....	39
3.1.1.4.2.1 Diagnose Foliar do Milho, Leitura de Clorofila e Área das Folhas.....	39
3.1.1.4.2.2 Avaliação do Sistema Radicular do Milho.....	40
3.1.1.4.2.3 Massa Seca da Parte Aérea do Milho e Extração de Nutrientes.....	40
3.1.1.4.2.4 Produtividade de Grãos, Componentes de Rendimento e Concentração de Nutrientes nos Grãos de Milho	40
3.1.1.4.2.5 Eficiência do Gesso na Utilização do Nitrogênio.....	41
3.1.1.4.2.6 Análises Estatísticas.....	41
3.1.2. Experimento em Colunas de Solo.....	42
3.1.2.1 Coletas das Colunas Indeformadas de Solo.....	42
3.1.2.2 Localização e Montagem do Experimento.....	43
3.1.2.3 Delineamento Experimental.....	43
3.1.2.4 Semeadura e Adubação.....	44
3.1.2.5 Manejo da irrigação.....	44
3.1.2.6 Avaliações.....	44

3.1.2.7	Análises Estatísticas.....	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1.	EXPERIMENTO REALIZADO NO CAMPO.....	46
4.1.1	Alterações nos atributos químicos do solo	46
4.1.1.1	Acidez Ativa (pH), Acidez Potencial (H + Al) e Acidez Trocável (Al).	46
4.1.1.2	Cálcio, Magnésio, Potássio, Relação Ca/Mg e Saturação por Alumínio	48
4.1.1.3	Fósforo, Nitrato e Sulfato.....	55
4.1.1.4	Micronutrientes e Metais Pesados.....	65
4.1.2	Atributos de Crescimento Radicular do Milho.....	72
4.1.3	Leitura de Clorofila (Índice SPAD), Área Foliar e Concentração de Nutrientes nas Folhas de Milho.....	76
4.1.3.1	Leitura de Clorofila (Índice SPAD) e Área foliar.....	76
4.1.3.2	Nutrientes nas Folhas.....	78
4.1.4	Produção de Matéria Seca e Extração de Nutrientes pela Cultura do Milho.....	81
4.1.5	Concentração e Exportação de Nutrientes pelos Grãos de Milho.....	88
4.1.6	Produtividade de grãos de milho.....	94
4.1.7	Eficiência do Gesso na Utilização do Nitrogênio.....	96
4.2.	EXPERIMENTO REALIZADO EM COLUNAS DE SOLO.....	102
4.2.1	Alterações nos atributos químicos do solo	102
4.2.2	Atributos de crescimento radicular do milho.....	111
4.2.3	Matéria seca (MS) e Extração de Nutrientes pelas Plantas de Milho	115
4.2.4	Lixiviação de Nutrientes.....	118
5.	CONCLUSÕES	122
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é o nutriente absorvido em maior quantidade pelo milho, e também o que mais limita o seu desenvolvimento, a crescente necessidade de intensificar a produção e elevar a produtividade tem acarretado em aumento na demanda por fertilizantes nitrogenados. O consumo de N na agricultura brasileira aumentou mil vezes nos últimos 50 anos, chegando a 2,5 milhões de toneladas de N em 2008 (Cantarella e Montezano, 2010), com potencial de aumentar ainda mais esse consumo em vista do aumento da produtividade das culturas (GOMES et al., 2007).

Uma questão importante da adubação nitrogenada é a sua eficiência relativamente baixa. A média de eficiência de uso do N por cereais, no mundo, é de apenas 33% (RAMBO et al., 2007). Considerando os 67% de N que não são absorvidos pelas plantas, há uma perda anual estimada de 15,9 bilhões de dólares com a adubação nitrogenada, além do que os fertilizantes nitrogenados são produzidos principalmente a partir de combustíveis fósseis não renováveis (RUAN e JOHNSON, 1999). No Brasil, os fertilizantes nitrogenados são os insumos que mais oneram o custo de produção da cultura do milho (AMADO et al., 2002). Além do prejuízo econômico ocasionado pela perda do nutriente essencial para as plantas (AMADO et al., 2002), as perdas de N-NO_3^- também geram grande preocupação do ponto de vista ambiental. Por causa de sua alta mobilidade no solo, o NO_3^- pode alcançar o lençol freático e águas superficiais resultando em poluição e eutrofização (SCHIMITID et al., 2002).

Para melhorar a absorção de nutrientes é necessário um sistema radicular bem distribuído ao longo do perfil do solo. Garnett, Com e Kaiser (2009) comentam que maior absorção de N-NO_3^- ocorre com melhor desenvolvimento e aprofundamento no sistema radicular das plantas. Entretanto, para que as raízes se aprofundem no solo para absorvê-lo, é necessário que as condições químicas e físicas no perfil do solo sejam propícias para o desenvolvimento das raízes. No Brasil, o calcário é largamente o insumo mais utilizado para melhorar as condições de acidez no solo.

Com a adoção do sistema plantio direto, que já ocupa uma área superior a 25 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2006), a correção da acidez do solo passou a ser realizada por meio

da aplicação de calcário na superfície, sem incorporação. Considerando a baixa solubilidade do calcário em água e a limitada mobilidade dos produtos de sua dissolução no solo, o efeito da calagem superficial tem sido mais pronunciado nas primeiras camadas do solo, sendo pequeno o movimento do corretivo além do local de sua aplicação (CAIRES et al., 1998, 1999, 2000, 2006). A acidez nas camadas subsuperficiais, em casos de níveis tóxicos de alumínio (Al) e/ou deficiência de cálcio (Ca), pode comprometer a penetração de raízes, dificultando a absorção de N pelas plantas (FAGERIA e BALIGAR, 2005)

O gesso agrícola, por ser relativamente solúvel e apresentar alta mobilidade no solo, é capaz de reduzir a toxicidade de Al e aumentar a disponibilidade de Ca em camadas do subsolo (van RAIJ, 2008). Estudos têm demonstrado efeito favorável do gesso na absorção de N pelas culturas de milho (SOUSA e RITCHEY, 1986), sorgo (RAIJ et al., 1988) e cevada (CAIRES et al., 2001). Como a melhoria nas condições de fertilidade no subsolo com a aplicação de gesso agrícola proporciona um ambiente mais favorável para o crescimento radicular, segundo Garnett; Com e Kaiser, (2009) é possível que o maior aprofundamento das raízes aumente a absorção de N em profundidade, otimizando assim a eficiência do uso de N pelas plantas de milho.

Salvagiotti et al. (2009) realizaram um estudo pioneiro visando avaliar a influência do enxofre (S) sobre o N, e verificaram que o S apresentou um importante potencial em recuperar o NO_3^- do solo e em melhorar a nutrição de N pelas plantas, reduzindo aos riscos de poluição pelo íon NO_3^- . Gyori (2005) obteve uma correlação linear positiva, com 552 pontos avaliados, entre a concentração de N e de S na planta.

Considerando que o N é exigido em elevadas quantidades pela cultura do milho, que o NO_3^- apresenta movimentação facilitada no perfil do solo e que maior aprofundamento das raízes e a disponibilidade de S podem influenciar a absorção do N pelas plantas, levanta-se a hipótese de que a aplicação de gesso agrícola em sistema plantio direto pode maximizar a eficiência da adubação nitrogenada para o milho, resultando em ganhos na produtividade de grãos. Desta forma o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da aplicação superficial de gesso e nitrogênio em cobertura nos atributos químicos do solo, no crescimento radicular, na eficiência do uso de nitrogênio e na produtividade de grãos de milho cultivado em sistema plantio direto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 NITROGÊNIO

2.1.1 Adubação Nitrogenada

O nitrogênio é um dos mais importantes nutrientes para as culturas visando a obtenção de elevadas produtividades (PAULETTI, 2000). É constituinte de vários compostos nas plantas, destacando-se todos os aminoácidos, que são constituintes da proteína, também é constituinte da clorofila e ácidos nucleicos. Dessa forma, as principais reações bioquímicas em plantas envolvem a presença do N (CANTARELLA, 2007), o que acarreta grande demanda do nutriente pelas plantas. Por isso, o N ocupa uma posição única na exigência pelas culturas quando comparado aos demais nutrientes. (HOFMAN e CLEEMPUT, 2004).

Segundo Fageira e Baligar (2005), Hofman e Cleemput (2004) e Umar e Iqbal (2006), pelo fato de todos os solos em seu estado natural serem deficientes em N, da deficiência de N ser a principal desordem nutricional que limita a produtividade agrícola no mundo e da constante necessidade de reposição do N para tornar a produção de grãos mais sustentável, seja por fertilizantes orgânicos ou minerais, sendo muitas vezes o N considerado um seguro contra as perdas de produtividade e perdas econômicas, excessivas quantidades de fertilizantes nitrogenados têm sido aplicados nas culturas. Zhu e Chen (2002) elucidaram a importância do fertilizante nitrogenado na produção de alimentos na China, ao obter correlação positiva entre o aumento de N aplicado e as produtividades obtidas no país nos últimos 50 anos.

Como se pode visualizar na figura 1, a utilização do N como fertilizante iniciou-se na década de 1940, tendo grande expansão com a revolução verde na década de 1960 (Ladha et al., 2010), chegando atualmente a um consumo global de aproximadamente 83 milhões de toneladas por ano (FAO, 2004). Quando se considera a área agrícola no mundo, o consumo médio é de cerca de 50 kg de N ha⁻¹ por ano (SMIL, 1999). Segundo Umar e Iqbal (2006), essas quantias de fertilizantes nitrogenados são destinadas para suprir a alimentação de 6,4

bilhões de pessoas, já que 50% da alimentação da população humana baseia-se na fertilização com N (LADHA et al., 2010).

O cenário brasileiro não difere do mundial (Figura 2), pois de acordo com Malavolta e Moraes (2006), o consumo de N no Brasil nos últimos 50 anos aumentou mais de 1000 vezes. O aumento mais expressivo foi no período de 1996 a 2004, passando de 1,18 para 2,24 milhões de toneladas de N por ano, sendo que o consumo atual do Brasil está em torno de 2,5 milhões de toneladas por ano (CANTARELLA e MONTEZANO, 2010). Entretanto, vale destacar que o aumento no consumo relativo de N foi bem menor que o observado para P e K no mesmo período (LOPES; BASTOS e DAHER, 2007).

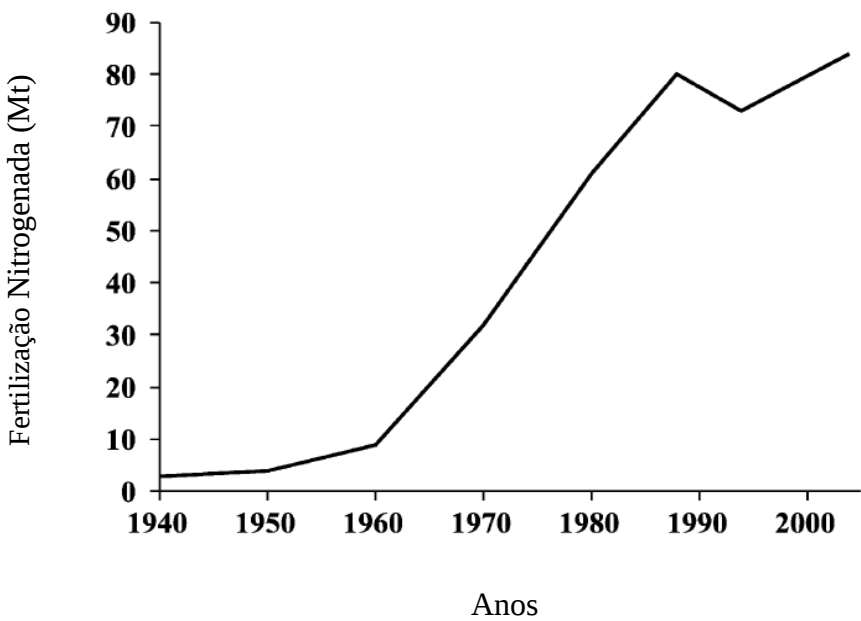


FIGURA1. Consumo global de fertilizantes nitrogenados ao longo dos anos (FAO, 2004).

Ao verificar as relações de consumo entre $N/P_2O_5/K_2O$ em culturas agrícolas (exceto a soja) no Brasil, no ano de 2003, Lopes, Bastos e Daher (2007) obtiveram valores de 1,19/1,00/1,23. Quando essa relação é comparada à de países que apresentam agricultura mais tecnificada para obtenção de altas produtividades, tem-se 2,82/1,00/1,00. Sendo assim, os autores concluíram que, mesmo com o aumento no consumo de N nos últimos anos, a subutilização de N ainda é um dos fatores mais limitantes para o aumento da produtividade de muitas culturas em condições brasileiras. Dessa forma, poderia presumir-se que maiores quantidades de adubos nitrogenados deveriam ser empregadas na produção de grãos no Brasil, aumentando a demanda nacional pelo fertilizante. Segundo os mesmo autores, isso geraria uma preocupação econômica para o país, uma vez que a produção nacional de N foi

praticamente a mesma desde 1994, ou seja, quase todo o aumento no consumo aparente de N teve que ser suprido por importações.

Se por um lado a adubação com N é vital para a alimentação humana e necessária para tornar a atividade agrícola mais sustentável (Umar e Iqbal, 2006), a sua baixa eficiência gera grande preocupação principalmente do ponto de vista ambiental e econômico (LOPES; BASTOS e DAHER, 2007; HOFMAN e CLEEMPT, 2004; RUAN e JOHNSON, 1999). Isto porque os fertilizantes nitrogenados são produzidos principalmente a partir de combustíveis fósseis não renováveis, e apresentam grande potencial de perdas (SPIERTZ, 2009), podendo ser transferidos para outros ecossistemas além das lavouras e converter-se em poluentes de águas superficiais ou subterrâneas e da atmosfera (CANTARELLA, 2007).

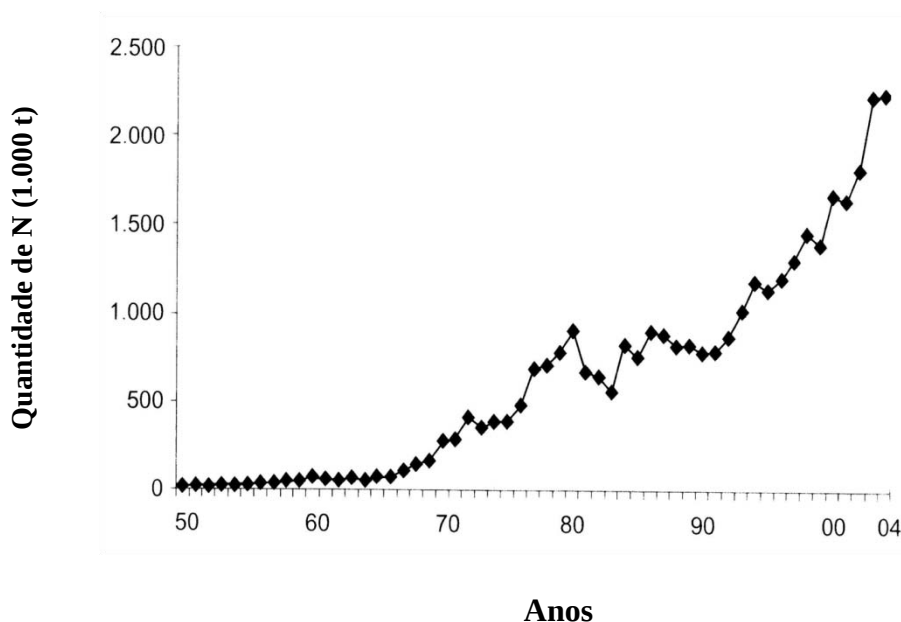


FIGURA 2. Evolução do consumo de nitrogênio no Brasil no período de 1950 a 2004 (LOPES; BASTOS e DAHER, 2007).

2.1.2 Perdas de Nitrogênio: impactos ambientais e econômicos

A aplicação de N no solo está sujeita a perdas por volatilização, imobilização, desnitrificação e lixiviação, e sua eficiência de utilização pelas plantas é regulada por fatores de solo, tipo de cultura, dose, frequência da aplicação e tipo de fertilizante (CABEZAS e COUTO, 2007), além de fatores climáticos como quantidade e intensidade de precipitação pluvial, irrigação, e sistema de cultivo (SÁ et al., 2007). Sendo assim, frequentemente tem-se baixo aproveitamento do N aplicado para as plantas (CANTARELLA, 2007; SPIERTZ, 2009; LOPES; BASTOS e DAHER, 2007; PAULETTI, 2000; HOFMAN e CLEEMPUT, 2004; UMAR e IQBAL, 2006).

O aproveitamento do N aplicado pelas plantas é definido pela eficiência de uso do nitrogênio (EUN), que representa a quantidade de grãos produzida pela aplicação unitária de

N (HOFMAN e CLEEMPT, 2004). No mundo, a EUN em grãos é de apenas 33%. Considerando os 67% de N que não são aproveitados, estima-se uma perda anual de 15,9 bilhões de dólares com a fertilização nitrogenada (RUAN e JOHNSON, 1999).

Além do aspecto econômico, o baixo aproveitamento do N aplicado acarreta grande impacto ambiental mesmo quando as perdas são consideradas relativamente baixas (JACKSON 2000). Segundo Cantarella (2007), quando transferido de um ecossistema para outro, o N se torna um grande poluente.

O transporte de N dos ecossistemas se dá por emissão para a atmosfera, por meio de erosão laminar e lixiviação. Os principais poluentes atmosféricos são os óxidos nítrico (NO) e nitroso (N₂O) e a amônia (NH₃), que intensificam o efeito estufa. O nitrato (NO₃⁻), por meio das águas superficiais e lixiviação, tende a contaminar o lençol freático (CANTARELLA, 2007; LOPES, BASTOS e DAHER, 2007; JACKSON, 2000)

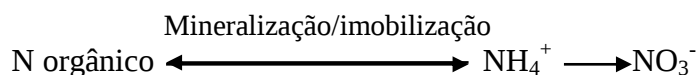
Rockstrom (2009), ao realizar um estudo sobre o ciclo de N, abordando os principais impactos ambientais do excesso de N na atmosfera, alerta que o consumo atual deste elemento já causou uma completa alteração no seu ciclo na terra. Segundo o autor, a entrada média anual de N₂ no mundo é de 120 milhões de toneladas. Como citado anteriormente, 83 milhões de toneladas provêm dos fertilizantes nitrogenados (FAO, 2004), sendo o restante de outras fontes, como orgânica e reciclagem. Sabe-se que metade do total de N adicionado é removida como produto colhido, que é destinado à alimentação (LADHA et al., 2010), sendo que o restante tem os seguintes destinos: incorporado, matéria orgânica ou perdido. Com base em dados semelhantes, Malavolta e Moraes (2006) comentam que a lixiviação e a erosão são responsáveis por 37 milhões de toneladas de perdas anuais que, segundo Smil (1999), acabam atingindo as águas subterrâneas, rios e oceanos. A volatilização de NH₃ no solo e da vegetação contribui com 21 milhões de toneladas por ano, que acarretam em elevação dos gases na atmosfera, e as perdas por desnitrificação e nitrificação são da ordem de 14 milhões de toneladas por ano (SMIL, 1999).

2.1.3 Nitrogênio no Solo

Uma das causas das elevadas perdas de N é pelo fato de este nutriente apresentar uma série de reações com o solo e micro-organismos que governam seu destino e disponibilidade.

O N esta presente no sistema solo-planta em ampla diversidade de formas químicas, sendo que o grande estoque deste nutriente no solo encontra-se na matéria orgânica, a qual representa normalmente mais de 95% do N total. O N na forma orgânica não é diretamente aproveitado pelas plantas, precisando ser mineralizado para produzir NH₄⁺, que poderá dar

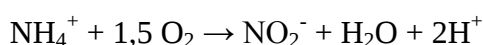
origem ao NO_3^- , pela nitrificação, sendo ambas as formas iônicas disponíveis para as plantas (CANTARELLA e MONTEZANO, 2010). Por outro lado, tem-se a imobilização que representa o processo inverso, em que as formas de N mineral são incorporadas às células microbianas do solo, tornando-as indisponíveis às culturas (BAYER e FONTOURA, 2006). O balanço entre a mineralização e imobilização pode ser visualizado pelo seguinte esquema:



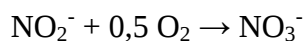
As condições consideradas ótimas para a mineralização do N orgânico são aquelas que favorecem a atividade dos microrganismos: pH entre 6 e 7, condições aeróbicas, e umidade e temperatura elevadas, as quais também favorecem o processo de nitrificação.

A nitrificação, ou oxidação do N amoniacal a NO_3^- , é realizado por um grupo de bactérias específicas que consomem o NH_4^+ , oxidando-o a NO_2^- e, posteriormente, a NO_3^- . Dessa forma, a nitrificação ocorre em duas etapas:

a) Conversão de NH_4^+ a NO_2^-



b) Oxidação de NO_2^- a NO_3^- :



Ao final da reação de nitrificação ocorre a transferência de 8 elétrons, 6 na primeira e 2 na segunda etapa, e a valência do N passa de -3 para +5. Vale destacar que para cada mol de NH_4^+ ocorre a liberação de dois moles de H^+ , sendo essa reação um fator que contribui para a acidificação dos solos agrícolas (van RAIJ, 1991), que é ocasionada pela remoção dos cátions básicos pelo NO_3^- , por meio da lixiviação (SOUZA et al., 2007).

Por outro lado, a presença de NO_3^- pode melhorar a distribuição de bases ao longo do perfil do solo em plantio direto, uma vez que nesse sistema de cultivo a movimentação de NO_3^- no perfil do solo é mais acentuada do que no sistema convencional de preparo (LOPES et al., 2004). Isso porque, com menor evaporação e melhor estruturação ao longo do perfil, a taxa de infiltração de água tende a ser maior em plantio direto e o ânion NO_3^- acompanha o fluxo da água para as camadas mais profundas. Com isso, quantidades equivalentes de cátions são lixiviadas no perfil do solo, os quais podem ser absorvidos pelas raízes das plantas nas camadas subsuperficiais. Os cátions acompanhantes são liberados e adsorvidos nas cargas negativas do solo, o que pode favorecer a ação da calagem em profundidade (LOPES et al., 2007). A adubação nitrogenada merece atenção especial no sistema plantio direto tendo em vista que os ânions gerados no solo pela aplicação de N em cobertura apresentam potencial para incrementar a oferta de cátions de caráter básico na solução percolada, podendo favorecer a nutrição das plantas (FOLONI et al., 2006).

Outro processo extremamente importante para a dinâmica do N no solo é a desnitrificação. Cantarella (2007) definiu a desnitrificação como um processo respiratório, que acontece na ausência de O_2 , no qual óxidos de N servem como receptores finais de elétrons [$2NO_3^- + 5H_2 + 2H^+ \rightarrow N_2 + 6H_2O$], sendo este processo realizado por bactérias facultativas. Ainda, segundo Cantarella (2007), a desnitrificação é o principal processo biológico pelo qual o N reativo retorna à atmosfera na forma de N_2 . Do ponto de vista agrícola, a desnitrificação representa a perda de NO_3^- , ou seja, a perda de um nutriente caro e importante para as plantas (LADHA et al. (2010). Entretanto, se trata de um processo fundamental para o ciclo global do N (ROCKSTROM, 2009).

Diferentemente da nitrificação, que libera prótons e acidifica o meio, a desnitrificação consome prótons e alcaliniza o solo. O processo acontece em quatro etapas: $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow [NO] \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$, com reduções sucessivas do N. Os principais gases resultantes são o N_2O e N_2 .

Todas as transformações do N afetam a sua disponibilidade para as plantas e tornam o manejo da adubação nitrogenada bastante complexo porque a aplicação de N está sujeita a vários processos de perdas, com destaque para a lixiviação de NO_3^- e a volatilização de NH_3 (BAYER e FONTOURA, 2006).

2.1.4 Lixiviação de Nitrato

Bayer e Fontoura (2006) definem lixiviação como o processo de migração de nutrientes, na forma de complexos ou pares iônicos neutros em profundidade no perfil do solo, abaixo da zona de enraizamento das culturas.

As perdas de N por lixiviação ocorrem por meio do íon NO_3^- . A predominância de cargas negativas na superfície do solo e a baixa interação química do íon NO_3^- com os minerais do solo fazem com que o NO_3^- se encontre predominantemente em solução, estando sujeito à lixiviação (BAYER e FONTOURA, 2006; CANTARELLA, 2007; Van RAIJ, 1991). Já, o cátion NH_4^+ encontra-se em grande parte adsorvido às cargas negativas do solo, sendo seu potencial de perda por lixiviação relativamente pequeno (BAYER e FONTOURA, 2006).

As perdas de N- NO_3^- por lixiviação são extremamente relevantes e preocupantes. Smil (1999) realizou um estudo do comportamento do N em 40 ecossistemas em três continentes, e chegou a uma estimativa de perda anual de 17 toneladas de N por lixiviação. Esse é problema grave porque, além do prejuízo econômico pela perda de um nutriente essencial para as plantas (AMADO et al., 2002), as perdas de N- NO_3^- por lixiviação também geram grande preocupação do ponto de vista ambiental. Devido à sua alta mobilidade no solo,

o NO_3^- pode alcançar o lençol freático e também águas superficiais, resultando em poluição e eutrofização (JACKSON, 2000; OENEMA et al., 2010; SCHIMITID et al., 2002).

Da mesma maneira que diversos fatores influenciam o comportamento do N no solo, a lixiviação de NO_3^- também é governada por características de solo e clima. Segundo Hofman e Cleemput (2004), a textura do solo é um importante fator que determina a quantidade de NO_3^- lixiviado. A ocorrência de lixiviação em solos arenosos é maior do que em solos de textura argilosa. Isso foi confirmado no estudo de Sogbedji et al. (2000) que, ao avaliarem o efeito de doses de N em dois tipos de solo durante três anos, observaram que as perdas de N ao longo do tempo foram maiores no solo mais arenoso e proporcional ao regime de chuva. De acordo com Cantarella (2007), a velocidade de difusão do NO_3^- é maior em solos arenosos com agregados de menor tamanho, ou seja, quanto menor a taxa de difusão e maior o tamanho dos agregados, menor a lixiviação. Mas o autor ressalta que isto só é válido quando a maior parte do NO_3^- está ou é produzida no interior dos agregados, sendo o caso do N mineralizado a partir da matéria orgânica do solo, ou do N proveniente da adubação que esteve em contato com o solo por um período de tempo suficientemente longo para atingir um ponto de equilíbrio e migrar para os agregados, sendo desta forma lixiviado mais lentamente.

Os outros fatores mencionados por Hofman e Cleemput (2004) que determinam o potencial de perdas de NO_3^- por lixiviação seriam a quantidade e intensidade de chuva, e a dose e fonte do fertilizante. Smil (1999) e Sogbedji et al. (2000) mostraram que o aumento da dose de N aplicada acarreta em maior lixiviação de NO_3^- . Alcantara e Camargo (2010a,b) constataram que maiores quantidades de NO_3^- no solo movem-se no perfil com maior velocidade do que baixas quantidades do íon. Vale lembrar que o NO_3^- lixiviado não é oriundo apenas do fertilizante nitrogenado, sendo também proveniente do N da matéria orgânica (JACKSON, 2000). Mantovani et al. (2007) avaliaram a lixiviação de NO_3^- em colunas de solo, por meio do emprego de diferentes fontes de fertilizantes nitrogenados, e observaram que as fontes de N que continham NO_3^- foram as que apresentaram maior lixiviação do íon.

A contaminação das águas tem sido uma preocupação mundial, pois elevados níveis de NO_3^- têm sido encontrados em águas subterrâneas nos EUA (SOGBEDJI et al., 2000), Europa (ONEME et al., 2010), Japão (NAKAMURA et al., 2004), Golfo do México, Mar Mediterrâneo (MAENE, 2000), Filipinas (LADHA et al., 2010), China (ZHU e CHEN, 2002), por NO_3^- proveniente da agricultura.

Davis et al. (2003) contabilizaram a quantidade de N perdida por lixiviação nas parcelas de Madruguer nos EUA, onde vinha sendo realizado um estudo desde 1929, quando foram implantados os tratamentos de adubação. As quantidades de N lixiviadas até 2001

foram de 306, 470, 306, 436, 436, 436 kg ha⁻¹ nos tratamentos controle, adubação orgânica, adubação mineral com P, NP, NPK, e NPK+C (adubação mineral de NPK, mais aplicação de calcário), respectivamente. É interessante notar que mesmo quando não foi aplicada nenhuma fonte de N, ocorreu perda por lixiviação. Isso indica que, mesmo na ausência de fertilizante nitrogenado, ocorrem perdas por N lixiviado. Ao se calcular as perdas médias de N por lixiviação em cada tratamento, desde a instalação do experimento (1929) até a quantificação da quantidade lixiviada (2001), quantificaram-se perdas anuais de 4,25, 6,00 e 6,50 kg N ha⁻¹, para os tratamentos sem aplicação de N, com N mineral e com N orgânico respectivamente, cujos valores são mais baixos do que os estimados por Zhu e Chen (2002) na China, de aproximadamente 10-34 kg N ha⁻¹ por ano.

Cantarella (2007) realizou levantamento dos principais estudos de lixiviação de NO₃⁻ no Brasil, nos quais foram utilizados os traçados ¹⁵N. Concluiu que, de maneira geral, as perdas de N por lixiviação, provenientes dos fertilizantes, foram pequenas. Gava et al. (2006) estudaram o balanço do ¹⁵N da uréia no sistema solo-planta e obtiveram perdas de 30% e 21% de N em plantio direto e convencional, respectivamente, mas não atribuíram essas perdas ao processo de lixiviação.

Para Rambo et al. (2007), as baixas doses de N aplicadas no Brasil justificam, em parte, a menor preocupação quanto aos possíveis efeitos negativos da fertilização nitrogenada no ambiente. Mas este cenário deve mudar, considerando que o consumo de fertilizantes nitrogenados no Brasil vem aumentando (Figura 1) com respaldo de pesquisas científicas que sugerem maior uso do N na agricultura de nosso país (LOPES; BASTOS e DAHER, 2007).

Se, no Brasil, alguns autores relatam que o N é subutilizado, e maiores doses acarretariam em aumento na produção (LOPES; BASTOS e DAHER, 2007; RAMBO et al., 2007), em outras regiões do mundo comenta-se que a adubação nitrogenada está causando impactos negativos no ambiente e, por isso, o seu uso deveria ser minimizado (DAUBRESSE et al., 2010; LADHA et al., 2010; MAENE, 2000; NAKAMURA et al., 2004; ONEME et al., 2010; SOGBEDJI et al., 2000; ZHU e CHEN, 2002). De qualquer forma, há consenso de que a EUN pelas culturas deve ser aumentada, de forma que, com maior eficiência de uso do N pelas plantas, o aproveitamento do fertilizante nitrogenado será aumentado, podendo resultar em incremento na produtividade e em menores perdas de N para o ambiente (SCHIMITID et al., 2002; LADHA et al., 2010; CANTARELLA, 2007; HOFMAN e CLEPUT, 2004; DOBERMANN, 2005).

2.1.5 Eficiência da Utilização do Nitrogênio

A eficiência da utilização do N trata de um termo complexo que procura dimensionar a eficiência de aproveitamento do N pelas culturas. Sumarizando as definições de Doberman (2005), Fageira et al. (2005), Hofman e Cleemput (2004) e Ladha et al. (2010), tem-se:

$$\text{Eficiência agrônômica (EA, kg kg}^{-1}\text{)} = (G_N - G_0)/N_A,$$

onde G_N é a produtividade de grãos no tratamento com aplicação de N (kg ha^{-1}), G_0 é a produtividade de grãos no tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha^{-1}) e N_A é a quantidade de N aplicada (kg ha^{-1});

$$\text{Eficiência fisiológica (EF, kg kg}^{-1}\text{)} = (P_N - P_0)/(N_N - N_0),$$

onde P_N é a produtividade total da planta (grãos e palha) no tratamento com aplicação de N (kg ha^{-1}), P_0 produtividade total da planta (grãos e palha) no tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha^{-1}), N_N é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento com aplicação de N (kg ha^{-1}) e N_0 é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha^{-1});

$$\text{Eficiência agrofisiológica (EAF, kg kg}^{-1}\text{)} = (G_N - G_0)/(N_N - N_0),$$

onde G_N é a produtividade de grãos no tratamento com aplicação de N (kg ha^{-1}), G_0 é a produtividade de grãos no tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha^{-1}), N_N é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento com aplicação de N (kg ha^{-1}) e N_0 é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha^{-1});

$$\text{Eficiência na recuperação aparente (ERA, \%)} = (N_N - N_0/N_A) \times 100,$$

onde N_N é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento com aplicação de N (kg ha^{-1}), N_0 é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha^{-1}) e N_A é a quantidade de N aplicada (kg ha^{-1});

$$\text{Fator parcial de produtividade do N (FPP}_N\text{, kg kg}^{-1}\text{)} = G_N/N_A,$$

onde G_N é a produtividade de grãos no tratamento com aplicação de N (kg ha^{-1}) e N_A é a quantidade de N aplicada (kg ha^{-1}). Esse índice difere da EA porque não leva em consideração a produtividade de grãos no tratamento sem adubação nitrogenada, sendo normalmente utilizado para realizar comparações com outras práticas agrônômicas (LADHA et al., 2010); e

$$\text{Eficiência de uso do N (EUN, kg kg}^{-1}\text{)} = EF \times ERA$$

Para Cantarella (2007), a EUN pode ser estimada de duas maneiras, pelo método que mede a diferença entre os tratamentos com e sem N, e com o isótopo ^{15}N . Segundo o mesmo autor, os resultados de recuperação do N aplicado pelas plantas tendem a ser superestimados quando medidos pelo método da diferença, se o N fertilizante estimular o efeito da

mineralização do N da matéria orgânica ou crescimento radicular. Por outro lado, o uso do ^{15}N pode levar à subestimação da recuperação do fertilizante.

Hofman e Cleemput (2004) comentam que EUN nos cereais se encontra geralmente entre 40 e 60 kg de grãos por kg de N aplicado, entretanto podem ser atingidos valores superiores a 100 kg de grãos por kg de N aplicado. Isso normalmente não é obtido com o emprego de altas doses de N porque, a EUN, medida em termos de quantidade de produtos agrícolas por unidade de N aplicado, é inversamente proporcional à dose utilizada (CANTARELLA e MONTEZANO, 2010), tendo em vista que quanto maior a dose de N empregada, maiores são as chances de perdas de N (HOFMAN e CLEEMPUT, 2004).

Ladha et al. (2010) realizaram levantamento em 93 estudos de EUN na África, Austrália, Europa, América e Ásia com as culturas de trigo, milho e arroz. A EA para as culturas esteve entre 18 e 24 kg de grãos por kg de N aplicado, sendo os menores valores encontrados para o milho e os maiores para o arroz. A Ásia apresentou a maior média de EA, sendo que a menor ficou na Austrália, com valores de 21,5 e 8,0 kg kg⁻¹, respectivamente. A média mundial foi de 19,6 kg kg⁻¹ e a média das três culturas avaliadas foi de 20,6 kg kg⁻¹. A ERA da planta inteira foi maior para a cultura do milho (65%) e menor para a cultura do arroz (46%), sendo os melhores índices obtidos na Europa (68%), muito acima do pior índice que obtido na Austrália (46%). O comportamento da EF foi diferente da ERA, pois o arroz foi a cultura que apresentou a maior EF (52 kg kg⁻¹), com valores muito superiores aos encontrados para o milho, chegando a ser o dobro do valor obtido para o trigo. Em função de os principais produtores mundiais de arroz estarem no continente asiático (ALMANAQUE DO ARROZ, 2011), a Ásia foi o continente que obteve os maiores índices de EF (46 kg kg⁻¹), sendo o dobro daqueles encontrados no continente africano, que obteve os menores valores. O FPP_N (total de grãos produzidos a certo nível de N) foi similar para as culturas de arroz e milho (62 e 72 kg kg⁻¹, respectivamente), enquanto que o valor médio para a cultura do trigo foi de 44 kg kg⁻¹. Segundo os autores, isso sugere que as culturas de milho e arroz produziram melhores retornos econômicos, em função do N aplicado, do que a cultura do trigo. Opostamente, em relação ao observado para EA, a Austrália obteve o maior valor de FPP_N (54,0 kg kg⁻¹) e o menor valor foi encontrado na África (39,3 kg kg⁻¹), sendo que o valor médio mundial foi de 51,6 kg kg⁻¹.

Devido ao grande número de fatores que podem influenciar a EUN, Dobermann (2005) alerta que o índice FPP_N é o melhor parâmetro a se usar quando se compara a EUN entre regiões diferentes. Mesmo assim, o autor ressalta que quando se compara diferentes regiões devem ser considerados os erros gerados pela comparação de diferentes culturas sob diferenciados sistemas de manejo.

Dobermann (2005) realizou levantamento do FPP_N nos anos de 1999 a 2003 no mundo, separando as regiões em países desenvolvidos e em desenvolvimento, visando diminuir os erros em função dos diferentes sistemas de manejo. As regiões classificadas como desenvolvidas foram separadas em: América do Norte, Nordeste da Ásia, Oeste europeu, Leste europeu com Ásia, e Oceania, as quais obtiveram índices de FPP_N de 45, 71, 59, 90 e 46 $kg\ kg^{-1}$, respectivamente. As regiões classificadas como em desenvolvimento foram: África, Oeste asiático + Nordeste da África, Sul da Ásia, Sudeste da Ásia, Leste da Ásia e América Latina, com índices de FPP_N de 123, 34, 44, 53, 32 e 55 $kg\ kg^{-1}$, respectivamente. É interessante destacar que os altos índices obtidos no Nordeste asiático e Leste europeu + Ásia resultaram de situações completamente opostas. O alto índice obtido no Nordeste asiático deu-se em função de sua produção de grãos por hectare ser a maior de todas as regiões (6100 $kg\ ha^{-1}$). Já, no Leste europeu + Ásia, mesmo obtendo a menor produtividade por ha (2100 $kg\ ha^{-1}$), teve maior índice de FPP_N devido à baixa dose de N aplicada (25 $kg\ ha^{-1}$). O mesmo ocorreu com as regiões em desenvolvimento; o alto índice na África deu-se em função da baixíssima dose de N aplicada (9 $kg\ ha^{-1}$) e, mesmo o Leste asiático, sendo uma região que obteve elevada produtividade (4800 $kg\ ha^{-1}$), teve o menor índice de FPP_N em função da alta dose de N empregada (155 $kg\ ha^{-1}$), sendo esta dose superior às doses aplicadas nas regiões consideradas desenvolvidas. O autor constatou ainda que a média mundial do FPP_N foi de 44 $kg\ kg^{-1}$, valor um pouco abaixo do estimado por Ladha et al. (2010), de 51,6 $kg\ kg^{-1}$.

Lopes, Bastos e Daher (2007) fazem um alerta em seus estudos sobre uso e eficiência de fertilizantes nitrogenados de que há necessidade de ações que levem ao incremento no uso eficiente de N, mas principalmente daquelas que permitam implementar tecnologias que aumentem a eficiência da adubação nitrogenada. Tais ações são de fundamental importância quando se almeja aumentar a produtividade das culturas com sustentabilidade, e para que a vocação agrícola brasileira que possa ser exercida em sua plenitude.

Segundo Socolow (1999), o aumento na EUN traria ganhos não só na produtividade das culturas, mas também menor impacto no ciclo do N, diminuindo sensivelmente os gastos que envolvem todo o processo de fabricação até uso do fertilizante. O autor reforça ainda que todas as pesquisas na área agrícola deveriam ser feitas visando melhorar a EUN.

Devido à grande necessidade de se aumentar o EUN, diversas estratégias têm sido divulgadas visando diminuir as perdas de N e melhorar a eficiência da adubação nitrogenada, tais como: (i) não aplicar N em excesso, (ii) parcelar a adubação nitrogenada, (iii) aplicar N na época de maior demanda pela cultura, (iv) evitar aplicações antes de chuvas pesadas, (v) empregar fontes e doses adequadas de N, (vi) usar fontes de N com liberação controlada e sincronizada com o desenvolvimento da cultura, (vii) incorporar o fertilizante nitrogenado

(principalmente uréia) ao solo, e (viii) realizar controle da irrigação. A manipulação genética também tem sido uma estratégia utilizada para otimizar a EUN (CANTARELLA, 2007; DAUBRESSE et al., 2010; FAGEIRA e BALIGAR, 2005; HOFMAN e CLEPUT, 2004; MALHI et al., 2001; NAKAMURA et al., 2004).

Alguns autores comentam que as pesquisas, visando aumentar a EUN, deveriam ser voltadas, principalmente, para o sistema solo-planta, pois é neste sistema em que a maior diversidade de interações pode acarretar em maior ou menor utilização do N pelas plantas (DOBERMANN, 2005; SOCOLOW, 1999).

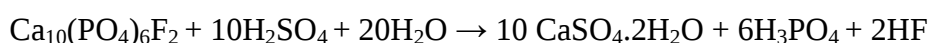
Fageria e Baligar (2005) relatam que as condições de acidez do solo prejudicam processos fisiológicos e morfológicos das plantas, além de restringirem o desenvolvimento do sistema radicular, dificultando a absorção de N pelas plantas. De acordo com van Raij (2008), as raízes, quando não conseguem se aprofundar no subsolo, deixam de absorver água e nutrientes, sendo o N-NO_3^- o principal deles. Quando se proporciona melhoria nas condições químicas do subsolo, resultando em melhores condições para desenvolvimento radicular das plantas, as raízes presentes em camadas mais profundas seriam capazes de absorver o NO_3^- percolado ao longo do perfil do solo, melhorando a EUN.

Considerando que o gesso agrícola apresenta alta mobilidade no solo, sendo capaz de reduzir a toxicidade de Al e aumentar a disponibilidade de Ca em camadas do subsolo (van RAIJ, 2008), e que estudos têm demonstrado efeito favorável do gesso na absorção de N pelas culturas de milho (SOUSA e RITCHEY, 1986), sorgo (van RAIJ et al., 1988) e cevada (CAIRES et al., 2001), a aplicação de gesso agrícola pode ser uma alternativa para melhorar a EUN.

2.2 GESSO AGRÍCOLA

O gesso agrícola ou fosfogesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um subproduto, na forma de pó esbranquiçado, obtido durante o processo de produção de ácido fosfórico, utilizado para a fabricação de superfosfato triplo e dos fosfatos de amônio. O processo de obtenção do ácido fosfórico baseia-se na ação de um ácido, geralmente o sulfúrico, sobre rocha fosfática finamente moída, previamente purificada e concentrada (VITTI et al., 2008).

A produção de gesso agrícola ou fosfogesso pode ser representada, de forma simplificada, por:



O uso de gesso na agricultura brasileira deve-se em grande parte à descoberta de suas propriedades, a partir de um experimento de adubação fosfatada, realizado por Ritchey et al. (1980), na região do Cerrado. Nesse estudo observou-se, após a ocorrência de um veranico,

que as plantas de milho apresentaram-se túrgidas e tiveram maior crescimento da parte aérea e do sistema radicular, bem como maior produtividade de grãos, quando foram cultivadas em parcelas que haviam recebido aplicação de superfosfato simples (SS) em comparação com as que haviam recebido aplicação de superfosfato triplo (ST). Essa diferença de resposta foi atribuída à presença de gesso no SS. A utilização de gesso na agricultura foi, a partir de então, incentivada visando proporcionar um destino para milhões de toneladas de gesso acumuladas nas indústrias em Cubatão, Uberaba e Catalão, oriundas da produção do ácido fosfórico (LOPES, BASTOS e DAHER, 2007). De acordo com Vitti et al. (2008), a cada 1000 kg de P_2O_5 na forma de ácido fosfórico produzido obtêm-se de 4 a 5 t de gesso; já na produção de 1000 kg de H_3PO_4 , são obtidas cerca de 5,5 t de gesso.

Após ser aplicado no solo, o gesso agrícola solubiliza-se e dissocia-se, conforme a seguinte reação simplificada: $CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + CaSO_4^0$. O íon Ca^{2+} realiza troca iônica com os cátions Mg^{2+} e K^+ , os quais podem formar pares iônicos com o SO_4^{2-} presente na solução ($MgSO_4^0$ e KSO_4^-). O $CaSO_4^0$ movimenta-se no perfil do solo, ocasionando aumento de Ca^{2+} e redução na saturação por Al em camadas do subsolo. Com a aplicação de gesso agrícola em um solo cuja acidez foi corrigida com a aplicação de calcário, após sua dissolução o sulfato movimenta-se para as camadas inferiores acompanhado por cátions, especialmente o Ca. A movimentação dos pares iônicos $MgSO_4^0$ e KSO_4^- também pode ocorrer após a aplicação de gesso, principalmente quando altas doses são empregadas. Nas camadas subsuperficiais do solo, ocorre a troca dos cátions pelo Al presente na solução, formando o par iônico $AlSO_4^+$, que não é tóxico para as plantas (van RAIJ, 2008).

Vale ressaltar que o ânion SO_4^{2-} , resultante da dissociação do gesso, não é um receptor de prótons (H^+) e, por isso, não é considerado um corretivo da acidez do solo. Segundo van Raij (2008), o gesso penetra facilmente no solo, reduz o efeito tóxico do Al no subsolo, supre Ca e S, melhora a agregação e a estrutura do solo, e promove lixiviação de Mg e K quando mal manejado. Conforme Farina et al. (2000), o aumento de Ca e a diminuição nos teores de Al, principalmente em camadas do subsolo, promovem diminuição na saturação por Al, sendo esse um dos efeitos mais marcantes que ocorre no solo por meio da aplicação de gesso agrícola.

O efeito do gesso agrícola se dá na melhoria das condições químicas além da camada superficial, surgindo como alternativa à melhoria do ambiente radicular ao longo do perfil do solo. Tal melhoria é de primordial importância, principalmente no sistema plantio direto, no qual a calagem é realizada na superfície. Isso porque devida à baixa mobilidade dos produtos da dissolução do calcário no solo, a aplicação do corretivo na superfície tem ação mais acentuada nas camadas superficiais (CAIRES et al., 1998; 1999; 2000).

O Al é o principal elemento associado ao efeito negativo da acidez do solo sobre as plantas. Com a acidificação do solo, a penetração de raízes torna-se limitada, particularmente no subsolo, resultando em plantas com sistema radicular mais raso, com correspondente menor utilização de água e nutrientes. Para van Raij (2010), a acidez excessiva nos solos brasileiros é a principal limitação ao desenvolvimento de raízes no subsolo.

Sá (1993) realizou levantamento da fertilidade do solo em 40 áreas sob plantio direto na região dos Campos Gerais do Paraná, e constatou valores de saturação por Al entre 16 e 35% na camada subsuperficial de 0,2-0,4 m, em grande parte das áreas amostradas. Nos solos do Cerrado brasileiro, Malluf et al. (2009) verificaram que a deficiência de Ca, associada ou não à toxidez de Al, não ocorreu apenas na camada superficial do solo, mas também abaixo dela, sendo que 70% das áreas avaliadas apresentaram saturação por Al em níveis considerados tóxicos em subsuperfície.

A aplicação de gesso na superfície do solo é feita com a finalidade de melhorar as condições químicas no subsolo, fazendo o que o calcário não é capaz de fazer com rapidez e eficiência – colocar Ca nas camadas mais profundas do solo. O gesso agrícola aplicado em superfície tem sido mais eficiente que o calcário incorporado em aumentar os teores de Ca no subsolo, conforme observado por Caires, Feldhaus e Blum (2001) e Caires et al. (2002). Isso favorece o crescimento radicular, resultando em exploração de maior volume de solo pelas raízes, deixando as plantas mais tolerantes a situações de déficit hídrico, e com maior capacidade de aproveitar os nutrientes provenientes do solo e dos fertilizantes, principalmente o N na forma de NO_3^- (van RAIJ, 2010). A melhor nutrição das plantas e a maior absorção de água, proporcionada pelo aprofundamento do sistema radicular, são de primordial importância nos cultivos agrícolas. Fageria (1998) realizou levantamento dos fatores que limitam a produtividade nos solos tropicais, e concluiu que a deficiência hídrica e o estresse nutricional eram os principais limitantes.

2.2.1 Efeito da Aplicação de Gesso Agrícola no Solo

Caires (2000) ressalta que o gesso não pode ser considerado um corretivo da acidez do solo, pois a neutralização da acidez é feita somente com produtos receptores de prótons (H^+), o que não é o caso dos produtos provenientes da dissolução do gesso. Dessa forma, o gesso não altera o pH do solo (VITTI et al., 2008). Entretanto, alguns estudos com gesso têm mostrado pequenos acréscimos no pH em camadas do subsolo após a sua aplicação (CARVALHO e van RAIJ, 1997; CAIRES et al., 1999, 2002, 2003, 2004, 2006). É provável que esses efeitos sejam em função da reação de troca de ligantes na superfície das partículas do solo envolvendo óxidos hidratados de ferro (Fe) e Al, com o SO_4^{2-} deslocando OH^- e,

assim, proporcionando neutralização parcial da acidez (VAN RAIJ, CANATARELLA e FURLANI, 1988).

Diversos estudos têm mostrado melhoria nas condições de fertilidade do solo com a aplicação de gesso, por meio de aumento nos teores de Ca e S-SO_4^{2-} , e redução na toxidez do Al (CAIRES et al., 1998, 2001, 2002, 2003, 2006; SALDANHA, 2005; SOUSA, LOBATO e REIN, 2005; SUMNER, 1990; TOMA et al., 1999; WATD, 2000). Também tem sido observado aumento nos teores de fósforo (P) no solo, na camada superficial, quando são aplicadas altas doses de gesso, uma vez que o P é uma impureza presente no gesso, na ordem de 6 g de P por kg de gesso (PAULINELLI et al. 1986).

A menor toxidez do Al em função da aplicação do gesso se dá pelo fato de o sulfato de cálcio reduzir o Al livre em solução (WATD, 2000). Além do sulfato, o gesso contém o ânion fluoreto (F^-), o qual forma complexos mais estáveis com Al do que o sulfato. Zambrozi, Alleoni e Caires (2007) realizaram estudo de especiação química de Al na solução do solo após aplicação de gesso, e notaram maior proporção de AlF do que de AlSO_4^+ . Carvalho e van Raij (1997) avaliaram o efeito da aplicação de gesso em colunas de solo, contendo cinco tipos de solo provenientes das camadas de 0,5 a 1,0 m de profundidade, e verificaram que o gesso agrícola reduziu a toxidez do Al pela formação de AlSO_4^+ e pela formação de complexos do Al com o F (AlF^{2+} , AlF_2^+ e AlF_3^0).

A importância do SO_4^{2-} na redução da toxidez de Al foi comprovada por Pavan 1983 apud van Raij (2008) ao notar que em solo com solução de CaSO_4 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ocorreu maior crescimento das raízes do cafeeiro, sendo esse efeito atribuído à menor atividade do Al^{3+} .

De acordo com Caires (2010), os efeitos tóxicos do Al no crescimento das raízes das plantas podem ser atenuados com a adição de Ca. O Mg também pode amenizar a toxidez do Al para crescimento das raízes das plantas. A capacidade do Mg em reduzir a toxidez do Al foi comprovada por Silva et al. (2005), ao constatarem que a adição de Mg em uma solução com Al aumentou de forma bastante expressiva o crescimento das raízes da soja.

Aumentos nos teores de Ca^{2+} e SO_4^- em todo o perfil de solo têm sido verificados com frequência nos estudos com aplicação de gesso (CAIRES et al., 1998; TOMA et al., 1999; CAIRES et al., 2002, 2004, 2006, 2011). Na região centro-sul do Paraná, incrementos nos teores de Ca^{2+} trocável e de sulfato em profundidade, decorrentes da adição de gesso, foram observados desde 8 meses (CAIRES; FELDHAUS e BLUM, 2001; BLUM et al., 2011) até 8 anos após a aplicação (JORIS, 2008; CAIRES; JORIS e CHURKA, 2011). Na região do Cerrado, Souza, Lobato e Rein et al. (2005) observaram movimentação de Ca e SO_4^{2-} no solo, e redução da toxidez de Al, 39 meses após a aplicação de gesso. Em condições temperadas, Toma et al. (1999) verificaram efeito residual ainda maior com o uso de gesso, tendo-se

observado aumento nos teores de Ca^{2+} trocável, em todo perfil do solo, e de sulfato, na camada de 0,6-0,8 m de profundidade, após 16 anos da aplicação.

A movimentação do S-SO_4^{2-} no solo, com acúmulo nas camadas subsuperficiais, tem sido proporcional ao tempo e à dose empregada. O pH mais elevado, o maior teor de matéria orgânica e a repulsão do sulfato por fosfato nas camadas superficiais do solo explicam os teores mais altos de sulfato nas camadas do subsolo. O S-SO_4^{2-} é mais fortemente retido em solos ácidos com menor densidade de carga elétrica negativa (van RAIJ e PEECH, 1972). Caires; Feldhaus e Blum (2001) constataram que, para cada tonelada de gesso, ocorreram aumentos nos teores de S-SO_4^{2-} de 16,5, 17,2, 15,1 e 10,6 mg dm^{-3} , respectivamente nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, após oito meses da aplicação. Depois de 20 meses, os aumentos foram de 9,7, 10,6, 14,2, 16,8 e 19,0 mg dm^{-3} por tonelada de gesso aplicada, para as mesmas profundidades (CAIRES et al., 2002). Blum et al. (2011) também verificaram que os teores de sulfato na profundidade de 0,6-0,8 m foram mais elevados após 20 meses do que após oito meses da aplicação de gesso. Tais resultados confirmam que o S-SO_4^{2-} do gesso se movimenta das camadas superficiais para o subsolo ao longo do tempo após a sua aplicação.

A adição de gesso, especialmente em altas doses, pode acarretar o deslocamento de Mg^{2+} e K^+ nos sítios de troca. Esses nutrientes ficam livres em solução podendo formar pares iônicos com o sulfato, proveniente do gesso, e se movimentar no perfil do solo.

Caires et al. (2001, 2002, 2003, 2006) e Blum et al. (2011) observaram que a aplicação de gesso reduziu os teores de Mg^{2+} nas camadas superficiais e aumentou os teores do nutriente nas camadas mais profundas. Esse efeito foi associado à formação de MgSO_4^0 na superfície do solo e sua migração para o subsolo (ZAMBROSI; ALLEONI, e CAIRES, 2007). Caires et al. (2002) constataram uma redução de 0,08, 0,05, 0,07 e 0,06 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Mg^{2+} , respectivamente nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m de profundidade, para cada tonelada de gesso aplicada. Churka (2008) verificou que cada tonelada de gesso aplicada acarretou em uma redução de 0,51 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Mg^{2+} trocável no solo, na camada de 0,1-0,2 m. Blum et al. (2011) observaram que após 20 meses da aplicação de gesso, somente metade do Mg^{2+} trocável da camada superficial do solo foi recuperada no subsolo (0,6-0,8m), indicando grande lixiviação do nutriente. Caires et al. (1999) constataram que a quantidade de Mg^{2+} lixiviada pelo gesso foi semelhante àquela adicionada com a aplicação de calcário dolomítico. De acordo com Caires et al. (2003), a aplicação de calcário dolomítico pode garantir maiores teores de Mg^{2+} na camada superficial do solo, sendo esta uma estratégia eficiente para minimizar as perdas de Mg^{2+} provenientes da aplicação de gesso.

Caires et al. (2011) constataram redução linear nos teores de K^+ trocável na camada superficial do solo (0-0,1 m) aos 9, 18 e 30 meses após a aplicação superficial de gesso. A maior dose de gesso empregada (12 t ha^{-1}) reduziu os teores de K^+ trocável em 0,72, 1,03 e $0,96 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente aos 9, 18 e 36 meses da aplicação. Mesmo assim, os teores de K^+ trocável se mantiveram em níveis superiores a $2,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada superficial do solo. Em um estudo realizado em casa de vegetação, Ernani et al. (2006) observaram lixiviação de 0,2, 0,3 e $0,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K^+ com a aplicação de gesso em doses equivalentes a 5, 10 e 20 t ha^{-1} . Blum et al. (2011) verificaram que a adição de gesso proporcionou movimentação de K^+ trocável no solo, da camada superficial para o subsolo, tendo-se observado redução no teor de K^+ na camada de 0,0-0,2 m, após 8 meses, e aumento no teor do nutriente na camada de 0,6-0,8 m, após 20 meses. Vale ressaltar que em solos com alto poder tampão sob plantio direto, a lixiviação de K^+ tem sido muito pequena e bem menor do que a de lixiviação de Mg^{2+} (CAIRES et al., 2004, 2006).

Em solos que apresentam elevados teores de Mg trocável, a movimentação de Mg^{2+} ao longo do perfil do solo, proporcionada pela adição de gesso, pode melhorar o balanço de cátions no solo, principalmente nas camadas superficiais, resultando em aumento na absorção de Ca^{2+} e K^+ pelas plantas em decorrência da redução nos teores de Mg^{2+} (CAIRES et al., 2011). Nessas circunstâncias, o aumento da relação Ca/Mg no solo pelo uso de gesso tem acarretado benefícios à produtividade das culturas, especialmente gramíneas (CAIRES et al., 2001, 2011; CAIRES, JORIS e CHURKA, 2011; CHURKA, 2008). Em um Latossolo Vermelho argiloso sob plantio direto com elevados teores de Ca, Mg e K trocáveis, e sem a presença de Al^{3+} trocável, Caires et al. (2011) constataram aumento na produtividade de milho por causa da maior absorção de Ca pela cultura decorrente do aumento na relação Ca/Mg do solo.

2.2.2 Efeito da Aplicação de Gesso Agrícola nas Culturas

A descoberta dos efeitos benéficos do uso de gesso agrícola se deu com a cultura do milho (RITCHEY et al., 1980). Maior absorção de nutrientes decorrente da adição de gesso foi observada na cultura do sorgo (van RAIJ, CANTARELLA e FURLANI, 1988). Até hoje, os principais resultados positivos na produtividade das culturas com a utilização de gesso têm sido observados em plantas gramíneas.

O aumento de produção de grãos pelo gesso em gramíneas tem sido relacionado à melhor nutrição das plantas em decorrência da melhoria nas condições de fertilidade do solo. Caires et al. (2002), trabalhando com a cultura do trigo, obtiveram resposta quadrática na produtividade de grãos com as doses de gesso empregadas. Esse aumento esteve relacionado

com o aumento na saturação por Ca e na disponibilidade S no solo. Saldanha (2005) observou aumento na produtividade de cana-de-açúcar em função do aumento de Ca e S no tecido foliar decorrente da adição de gesso. Caires, Feldhaus e Blum (2001) verificaram que a aplicação de gesso aumentou a absorção de N, P, K, Ca e S pela cevada, ocasionando acréscimo de 23% na produtividade de grãos. Vários trabalhos realizados com a cultura do milho têm mostrado influência da aplicação de gesso no aumento do teor de foliar de Ca, com reflexos positivos na produtividade de grãos (CAIRES, JORIS e CHURKA, 2011; CAIRES et al., 1999, 2004, 2011; JORIS, 2008; MASCHIETTO, 2010). A maior absorção de Ca pelas plantas com a adição de gesso tem sido decorrente do aumento no teor de Ca trocável e na relação Ca/Mg no solo (CAIRES et al., 1999, 2004; 2011; CAIRES, JORIS e CHURKA, 2011; MASCHIETTO, 2010).

Caires et al. (1999) avaliaram o desempenho das culturas de milho, trigo e soja em resposta à aplicação de gesso. Das três culturas avaliadas, somente a produtividade do milho foi aumentada com a aplicação de gesso. Resultado semelhante foi obtido por Caires; Joris e Churka (2011), em um experimento em que foram avaliados os efeitos da adição de gesso em quatro cultivos, sendo dois com soja e dois com milho. A aplicação de gesso aumentou a produtividade de grãos nos dois cultivos de milho, enquanto que não foi observada influência do gesso na produtividade de grãos nos dois cultivos com soja. Caires et al. (2011) também obtiveram aumento na produtividade de grãos de milho e ausência de resposta da soja, em dois cultivos, em decorrência da aplicação de gesso.

A resposta diferenciada das culturas de milho e soja ao gesso pode estar relacionada ao fato de as leguminosas apresentarem raízes com maior capacidade de troca catiônica que as gramíneas (CAIRES et al., 2011). Sendo assim, as raízes de milho seriam menos eficientes do que as raízes de soja para absorver Ca^{2+} . Por causa disso, o aumento na disponibilidade de Ca^{2+} no solo decorrente da aplicação de gesso favoreceria mais a absorção de Ca pela cultura do milho do que pela cultura da soja. Destaca-se que a maior produtividade de grãos de milho em resposta à adição de gesso, observada por Caires; Joris e Churka (2011) e Caires et al. (2011), esteve correlacionada com o aumento no teor de Ca^{2+} trocável no solo, até a profundidade de 0,6 m. Outra hipótese levantada por Caires et al. (2011) para explicar o comportamento diferenciado das culturas de milho e soja frente à aplicação de gesso é que as plantas de soja apresentam maior eficiência na absorção de S do que as plantas de milho. Isso foi comprovado por Silva et al. (2003) mediante cultivo de milho e soja em solução nutritiva com ^{35}S . Demonstrou-se, nesse estudo, que o milho, apesar de apresentar maior absorção radicular de S, reteve grande parte desse nutriente na raiz da planta, enquanto a soja absorveu consideravelmente menos, porém apresentou maior eficiência de translocação.

De acordo com van Raij (2008), o grande potencial do gesso em aumentar a produtividade da cultura do milho estaria relacionado ao fato de o gesso agrícola melhorar a absorção de N-NO_3^- pelo milho, ao estimular o crescimento radicular. Esse efeito do gesso na melhoria do crescimento radicular, com consequente maior absorção de N pelas plantas, foi comprovado por Ritchey et al. (1980) para a cultura do milho, por Caires, Feldhaus e Blum (2001) para a cultura da cevada e por Souza, Lobato e Rein (2005) para as culturas de milho e trigo. Destaca-se que em todos esses estudos houve déficit hídrico durante o desenvolvimento das culturas, o que permitiu o efeito mais pronunciado do gesso na absorção de água e nutrientes em relação ao tratamento sem gesso.

Matula e Pechova (2007), avaliando o efeito de tratamentos com gesso no crescimento inicial e na absorção de nutrientes pela cevada, em casa de vegetação, observaram que a aplicação de gesso aumentou em 15% a produção de biomassa de cevada, e melhorou a utilização de N pelas plantas. Churka (2007) também observou melhor utilização do N pela cultura do trigo com aplicação de gesso. O aumento na absorção do N pelas plantas com o uso de gesso tem sido consequência do maior crescimento radicular ocasionado pela melhoria nas condições químicas do subsolo (CAIRES et al., 2004).

O melhor aproveitamento do N pelas plantas decorrente da aplicação de gesso também pode estar relacionado com o fornecimento de S. Alguns autores têm mostrado sinergismo entre N e S em diferentes culturas (JACKSON, 2000; MALAVOLTA e MORAIS, 2007; SALVAGIOTTI et al., 2009; SILVEIRA, 2009).

2.2.3 Interação $\text{N} \times \text{S}$

A interação $\text{N} \times \text{S}$ pode ser explicada fisiologicamente pelo fato de o S na planta ser fundamental para a formação de aminoácidos e proteínas, sendo que a falta de S acarreta em menor quantidade desses compostos e diminui a EUN (MALAVOLTA e MORAIS, 2007). Além disso, o S também faz parte da ferredoxina, molécula transferidora de elétrons envolvida no processo fotossintético, e atua na redução do nitrato e na fixação de N_2 atmosférico (MENGEL e KIRKBY, 2001; MALAVOLTA e MORAIS 2007).

Silveira (2009) estudou o efeito de doses de N e S em pastagem e observou que a aplicação de doses elevadas de N sem S resultou em deficiência de S nos dois cultivos de brachiaria, em função das elevadas relações N/S nas folhas. Além disso, as plantas deficientes em N não responderam à aplicação de S. O autor concluiu que o metabolismo de N na planta demanda S e a adubação com altas doses de N visando aumentar a produtividade pode ser um desperdício, se a demanda de S não for devidamente suprida.

Zia et al. 1999 apud van Raij (2008) comentam que o aumento na disponibilidade de S melhora a eficiência do N como fertilizante. Jackson (2000) avaliou o efeito de doses de N e S na cultura da canola durante cinco anos e obteve as maiores produtividades quando as maiores doses de N foram combinadas com as maiores doses de S. Na ausência de S, as maiores doses de N ocasionaram decréscimo na produtividade; entretanto, quando se adicionou S, as maiores doses de N incrementaram a produtividade de canola. Notou-se ainda que a aplicação de N aumentou a quantidade de S na planta e na semente de canola.

Byori (2005) avaliaram o efeito da fertilização com S em 13 cultivares de trigo em dois anos agrícolas na Hungria, com cinco níveis de fertilização NPK, e obtiveram uma correlação linear positiva, com 552 pontos, entre a % de N e a de S nos grãos de trigo. Salvagiotti et al. (2009) avaliaram os efeitos da aplicação de N e S na cultura do trigo e verificaram que a aplicação de S só influenciou a absorção de N pelo trigo quando as maiores doses de N foram aplicadas. Esse efeito foi atribuído à melhor recuperação do N do solo promovido pelo S. Dessa forma, a aplicação de S apresenta um importante potencial na melhoria da nutrição de N pelas plantas, por meio da recuperação do NO_3^- no solo.

Campos (2004) estudou a fertilização do milho com sulfato de amônio e constatou que os teores de S no tecido do milho aumentaram linearmente com as doses de N aplicadas. Pagni et al. (2009) não obtiveram relação entre a absorção de N e de S pela cultura do milho, sendo esse resultado justificado pelas baixas doses de S utilizadas no estudo. Os autores sugeriram utilizar variados níveis de N e S nas pesquisas para que se possa obter melhor entendimento da interação $\text{N} \times \text{S}$ na cultura do milho.

2.3 CULTURA DO MILHO

A cultura do milho é uma das mais estudadas do ponto de vista nutricional dada a importância desse cereal não só para a alimentação humana e animal, como também em sua utilização como matéria prima nas indústrias de diversos setores.

O milho detém a terceira maior área de cultivo agrícola no mundo, tendo ocupado cerca de 160 milhões de hectares em 2009, sendo superado apenas pelas culturas de arroz e trigo. Entretanto, a sua produção supera a dos demais cereais, tanto que em 2009 foram produzidos no mundo cerca de 817 milhões de toneladas de milho, enquanto que a produção global de arroz e trigo esteve ao redor de 680 milhões de toneladas. Isso é explicado pelo fato de a produtividade média mundial de milho ($5,1 \text{ t ha}^{-1}$) ser superior às produtividades de arroz ($4,2 \text{ t ha}^{-1}$) e trigo ($3,0 \text{ t ha}^{-1}$) (CIMILHO 2011).

O Brasil é o terceiro país do mundo com a maior área cultivada com milho, e também o terceiro maior produtor mundial de milho, perdendo somente para os Estados

Unidos da América (EUA) e a China, tanto em área cultivada como em produção de grãos. Em 2010, o Brasil produziu cerca de 56 milhões de toneladas de grãos de milho, em uma área de aproximadamente 13 milhões de hectares (CIMILHO, 2011).

Apesar de o Brasil ser o terceiro maior produtor e deter a terceira maior área de milho no mundo, o país não tem sido auto-suficiente, necessitando realizar importações do cereal para suprir a demanda interna (CONAB, 2008). Isso porque a produtividade brasileira de milho não corresponde aos índices de área e de produção. De terceiro maior produtor, o Brasil cai para oitavo em questão da produtividade, ficando atrás de países como a Indonésia e a África do Sul. Em 2009, a produtividade média de milho no Brasil foi de $3,7 \text{ t ha}^{-1}$, a qual pode ser considerada baixa por ser inferior à média mundial de $5,1 \text{ t ha}^{-1}$, e muito inferior à média dos dois países que detêm as maiores produtividades – EUA com $10,3 \text{ t ha}^{-1}$ e França com $9,1 \text{ t ha}^{-1}$.

A baixa produtividade média de milho no Brasil não reflete o bom nível tecnológico já alcançado por boa parte dos produtores voltados para lavouras comerciais, uma vez que as médias são obtidas nas mais diferentes regiões, em lavouras com diferentes finalidades e sistemas de cultivo (DUARTE et al., 2010). Destaca-se que, no mesmo ano de 2009, as produtividades médias na região sul do Brasil e no estado do Paraná foram de $5,7$ e $5,9 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente, as quais são superiores à média mundial e à da Argentina, que é o terceiro país em produtividade, com $5,6 \text{ t ha}^{-1}$.

Dentre os fatores que contribuem para a baixa produtividade média de milho no Brasil, destacam-se o manejo incorreto de corretivos da acidez do solo e de fertilizantes, principalmente os nitrogenados (FANCISCO, 2008). O N é o nutriente absorvido em maior quantidade pela cultura do milho, sendo necessários, em média, de 20 a 25 kg de N para a produção de uma tonelada de grãos (SANGOI et al., 2001). Mesmo na região sul Brasil, onde os maiores tetos de produtividade de milho do país têm sido obtidos, as recomendações de fertilizantes nitrogenados ainda não se encontram totalmente definidas principalmente porque (i) a seleção genética de híbridos de milho tem sido realizada sob altos níveis de N, o que direciona os novos híbridos a possuírem alta demanda pelo nutriente (SANGOI et al., 2001) e (ii) o milho é normalmente cultivado após a cultura de aveia preta, no esquema de rotação, o que acarreta em grande imobilização do N disponível pela palhada de aveia no início da sua decomposição, reduzindo a disponibilidade inicial de N para a cultura do milho (AMADO et al., 2002; SANGOI et al., 2007).

Quando o N é aplicado em doses aquém do necessário, é o fator que mais limita a produtividade de milho. Por outro lado, quando aplicado em altas doses, tende a reduzir a rentabilidade do agricultor, pois os fertilizantes nitrogenados são os que mais oneram o custo

de produção da cultura (AMADO et al., 2002). Além disso, quanto maior a dose de N aplicada, menor é a eficiência da aplicação e maiores são os riscos de perdas de N para o ambiente. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de estratégias que proporcionem melhor uso e aproveitamento do N aplicado na cultura do milho.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Os experimentos foram realizados em um Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa, manejado há cinco anos sob sistema plantio direto. Antes da instalação do experimento, foram realizadas análises químicas (Pavan et al., 1992) e granulométricas (EMBRAPA, 1997) do solo, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Análises químicas e granulométricas do solo.

Profun- didade	pH em CaCl ₂	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P ⁽¹⁾	C	V ⁽²⁾	Areia	Silte	Argila
m		mmol _c dm ⁻³					mg dm ⁻³	g dm ⁻³	%	g kg ⁻¹		
0,0-0,2	5,6	53,5	0	58	30	3,8	5,0	32	63	79	240	680
0,2-0,4	4,4	97,0	9	23	11	1,2	1,5	22	27	69	191	740
0,4-0,6	4,2	104,5	13	11	9	0,7	0,3	17	16	69	171	760

⁽¹⁾P Extração pela solução de Mehlich 1. ⁽²⁾V = Saturação por bases.

O solo apresentava baixa acidez e teores suficientes de Ca e Mg trocáveis na camada de 0,0-0,2 m, e acidez elevada, teores tóxicos de Al trocável e concentrações mais baixas de Ca e Mg trocáveis em subsuperfície (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m). Tais características do subsolo justificam o emprego de gesso visando a melhoria do ambiente radicular em camadas subsuperficiais (van RAIJ, 1991).

3.1.1 Experimento em Campo

O experimento foi realizado no município de Tibagi, PR, na fazenda Barbosa, cujas coordenadas geográficas de referência são 24°30'51" de latitude sul e 50°26'29" de longitude oeste, e altitude de 826 m (Figura3). No momento da instalação do experimento, a área experimental havia sido manejada durante cinco anos em sistema plantio direto.

O clima da região é classificado como Subtropical Úmido Mesotérmico, tipo Cfb conforme classificação de Köppen, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C,

verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida (IAPAR, 2011).



FIGURA 3. Localização geográfica do município de Tibagi (esfera em verde), dentro do contexto estadual e nacional.

3.1.1.1 Delineamento Experimental

O delineamento experimental empregado foi em blocos completos ao acaso, em esquema fatorial 4×3 , com três repetições. O tamanho das parcelas foi de 6×7 m. Os tratamentos foram constituídos por quatro doses de gesso na superfície antes da semeadura do milho (0, 5, 10 e 15 t ha⁻¹) e três doses de N em cobertura (60, 120 e 180 kg ha⁻¹). O gesso, oriundo de Cajati, apresentava as seguintes características: 268 g kg⁻¹ de umidade, 11 g kg⁻¹ de P₂O₅, 94 g kg⁻¹ de S e 186 g kg⁻¹ de Ca. As doses de gesso foram definidas a partir da dose calculada (DC) para elevar a saturação por bases do solo a 50% nas camadas subsuperficiais (0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m), por meio da equação: $DC = [(50 - V_{\text{solo}}) CTC_{\text{pH } 7}]/500$, sendo DC em t ha⁻¹, V em % e CTC_{pH 7} em mmol_c dm⁻³. O gesso foi aplicado em superfície uma semana antes da semeadura do milho. A aplicação de N em cobertura foi realizada na forma de nitrato de amônio (32% de N: 16% de N-NO₃⁻ e 16% de N-NH₄⁺), entre os estádios V₄ e V₆.

3.1.1.2 Cultura do Milho

A semeadura do milho (*Zea mays* L.) foi realizada em setembro de 2009, após o cultivo de aveia preta para a formação de palha, na densidade média de 6,5 sementes por metro e espaçamento de 0,8 m entre as linhas, visando uma população de 60 mil plantas por hectare. O híbrido utilizado foi o DKB 240YG, o qual possui elevado potencial produtivo e excelente desenvolvimento radicular, que confere ao híbrido tolerância ao estresse hídrico (DEKALB, 2011). Esse híbrido foi classificado como medianamente tolerante ao Al, de acordo com testes realizados em solução nutritiva no Laboratório de Melhoramento de Plantas da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

A adubação empregada na semeadura foi de 45 kg ha⁻¹ de N, 112 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O. A adubação de N em cobertura foi realizada aos 35 dias após a semeadura, de acordo com a dose de cada tratamento.

3.1.1.3 Condições Climáticas Durante o Cultivo do milho

A precipitação pluvial e as temperaturas médias ocorridas durante o período em que a cultura do milho esteve no campo são mostradas na figura 4. A precipitação pluvial total durante todo o ciclo de desenvolvimento do milho foi de 994 mm. Considerando que a precipitação pluvial média histórica da região para o mesmo período foi de 766 mm, houve 208 mm a mais de chuva que o normal durante o cultivo do milho. As chuvas foram bem distribuídas e, baseando-se na necessidade de água de acordo com as fases do ciclo da cultura propostas por Andrade et al. (2006), a precipitação pluvial foi maior que a necessária para o adequado desenvolvimento do milho durante todo o período de cultivo. Ressalta-se que desde a aplicação do gesso na superfície até o momento da amostragem do solo ocorreu uma precipitação pluvial de 1296 mm.

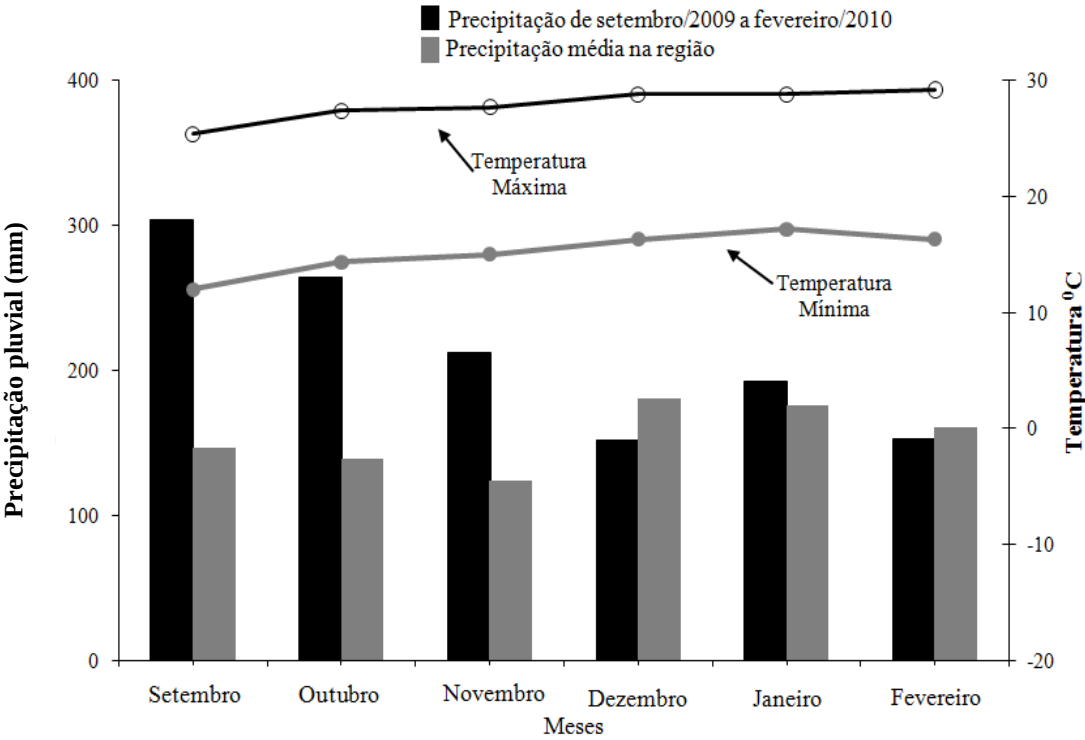


FIGURA 4. Dados médios mensais de precipitação pluvial histórica da região (10 anos), de precipitação pluvial durante o período de realização do experimento (setembro/2009 a fevereiro/2010) e de temperaturas máximas e mínimas ocorridas no mesmo período, em Tibagi, PR (FUNDAÇÃO ABC, 2011).

3.1.1.4 Avaliações

3.1.1.4.1 Análises Químicas do Solo

Amostras de solo foram retiradas nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, um mês após a colheita do milho, aos 6 meses após a aplicação do gesso. As amostras, nas profundidades de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, foram coletadas por meio de trado calador, retirando-se 15 subamostras por parcela para compor uma amostra composta. Nas profundidades de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, foram retiradas cinco subamostras, por meio de trado holandês, para constituir uma amostra composta. As amostras compostas, retiradas em todas as profundidades, foram divididas em duas partes. Uma parte foi imediatamente congelada após a coleta para a determinação de N-NO_3^- . A outra parte foi colocada para secar em estufa com circulação forçada de ar a 40°C e, após, as amostras foram moídas e passadas em peneira com malha de 2 mm. O pH foi determinado em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e a acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) foi determinada pelo método tampão SMP, conforme os métodos descritos em Pavan et al. (1992). Os teores de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados por meio de extração com solução de KCl 1 mol L^{-1} , e os teores de K^+ e P por extração com a solução de Mehlich 1 (PAVAN et al., 1992). Os teores de S-SO_4^{2-} foram determinados mediante extração com solução de fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e de acetato de amônio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em ácido acético $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ (Cantarella e Prochnow, 2001). O N-NO_3^- foi extraído conforme Cantarella e Trivelin (2001), e determinado pelo método FIA. Os teores de cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo (Pb), zinco (Zn), ferro (Fe) e manganês (Mn) também foram determinados por meio de extração com solução de DTPA pH 7,3 (ABREU et al., 2005) e leitura em espectrofotômetro de absorção atômica (AAS).

3.1.1.4.2 Avaliações na Cultura do Milho

3.1.1.4.2.1 Diagnose Foliar do Milho, Leitura de Clorofila, Área das Folhas e Concentração de N na Folha-índice.

No início do florescimento da cultura, amostras de folhas foram coletadas, retirando-se a folha imediatamente abaixo e oposta à espiga em 30 plantas por parcela. No terço médio das folhas retiradas realizaram-se 10 leituras de clorofila por meio de aparelho clorofilômetro (SPAD-502) e, em seguida, as folhas foram passadas em aparelho medidor de área foliar. Logo após, as folhas foram lavadas em água deionizada e colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60°C . Posteriormente, as amostras de folhas foram moídas e os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn foram determinados de acordo com os métodos descritos em Malavolta; Vitti e Oliveira, (1997). A concentração de N na

folha-índice do milho (N-folha) foi corrigida de acordo com a área foliar (Af), tendo-se obtido a concentração de N na área da folha-índice do milho (NAf, em $\text{g cm}^2 \text{ kg}^{-1}$), por meio da equação: $\text{NAf} = [(\text{Af} \times \text{N-folha}) \times \text{Af}/739]$, onde 739 cm^2 foi o maior valor obtido na leitura da área foliar.

3.1.1.4.2.2 Avaliação do Sistema Radicular do Milho

No fim do florescimento da cultura do milho, foram coletadas amostras de raízes por meio de trado cilíndrico, em quatro profundidades (0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m), retirando-se seis subamostras, sendo três na linha de semeadura e três nas entrelinhas, equidistantes 0,1m da planta, para formar uma amostra composta. As amostras, com 3,5 cm de diâmetro, foram coletadas somente nas doses 0 e 15 t ha^{-1} de gesso em todas as doses de N em cobertura, contabilizando, assim, seis tratamentos. Para dispersão do solo e separação das raízes, as amostras foram lavadas com água em peneira de malha de 0,5 mm. O comprimento de raízes foi avaliado pelo método proposto por Tennant (1975) e o raio médio e a superfície radicular de acordo com Schenk & Barber (1979).

3.1.1.4.2.3 Massa Seca da Parte Aérea do Milho e Extração de Nutrientes

No estágio R5-R6 da cultura do milho, retiraram-se 5 plantas por parcela em uma linha contínua de plantas da área útil, as quais foram separadas em folhas, colmos e espigas. A seguir, as amostras foram lavadas em água deionizada e colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60°C . A produção de matéria seca foi avaliada e, posteriormente, as amostras foram moídas. Os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn foram determinados de acordo com os métodos descritos em Malavolta; Vitti e Oliveira, (1997). A extração de nutrientes pela parte aérea da cultura do milho foi calculada multiplicando-se a produção de matéria seca pela concentração de nutrientes, em cada parte da planta (folhas, colmos e espigas).

3.1.1.4.2.4 Produtividade de Grãos, Componentes de Rendimento e Concentração de Nutrientes nos Grãos de Milho

A produtividade de grãos foi avaliada após a maturação fisiológica por meio de colheita manual e trilhagem em máquina debulhadora estacionária. Foram colhidos 10 m^2 centrais de cada parcela, desprezando-se as extremidades (bordaduras). Avaliaram-se os seguintes componentes de rendimento: comprimento e diâmetro da espiga, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e massa de 1000 grãos. Após a debulha, os grãos foram pesados determinando-se, então, a produtividade a 130 g kg^{-1}

de umidade. Em seguida, amostras de grãos foram moídas e as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn foram determinadas conforme Malavolta; Vitti e Oliveira, (1997).

3.1.1.4.2.5 Eficiência do Gesso na Utilização do Nitrogênio

Com base nos estudos de Doberman (2005), Fageria et al. (2005), Hofman e Cleemput (2004) e Ladha et al. (2010) foram calculadas as seguintes eficiências, considerando as quatro doses de gesso e as três de N:

$$\text{Eficiência agronômica (EA, kg kg}^{-1}\text{)} = (G_G - G_0)/N_A,$$

onde G_N é a produtividade de grãos no tratamento que recebeu determinada dose de gesso (kg ha^{-1}), G_0 é a produtividade de grãos no tratamento sem gesso (kg ha^{-1}) e N_A é a quantidade de N aplicada (kg ha^{-1});

$$\text{Eficiência fisiológica (EF, kg kg}^{-1}\text{)} = (P_G - P_0)/(N_G - N_0),$$

onde P_G é a produtividade total da planta (grãos e palha) no tratamento que recebeu determinada dose de gesso (kg ha^{-1}), P_0 produtividade total da planta (grãos e palha) no tratamento sem gesso (kg ha^{-1}), N_N é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento que recebeu determinada dose de gesso (kg ha^{-1}) e N_0 é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento sem gesso (kg ha^{-1});

$$\text{Eficiência agrofisiológica (EAF, kg kg}^{-1}\text{)} = (G_G - G_0)/(N_G - N_0),$$

onde G_G é a produtividade de grãos no tratamento que recebeu determinada dose de gesso (kg ha^{-1}), G_0 é a produtividade de grãos no tratamento sem gesso (kg ha^{-1}), N_G é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento que recebeu determinada dose de gesso (kg ha^{-1}) e N_0 é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento sem gesso (kg ha^{-1});

$$\text{Eficiência na recuperação aparente (ERA, \%)} = (N_G - N_0/N_A) \times 100,$$

onde N_G é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento que recebeu determinada dose de gesso (kg ha^{-1}), N_0 é a quantidade de N acumulada na planta (grãos e palha) no tratamento sem gesso (kg ha^{-1}) e N_A é a quantidade de N aplicada (kg ha^{-1});

$$\text{Fator parcial de produtividade do N (FPP}_N\text{, kg kg}^{-1}\text{)} = G_G/N_A,$$

onde G_G é a produtividade de grãos no tratamento que recebeu determinada dose de gesso (kg ha^{-1}), N_A é a quantidade de N aplicada (kg ha^{-1});

$$\text{Eficiência do gesso no uso do N (EUN, kg kg}^{-1}\text{)} = EF \times ERA$$

3.1.1.4.2.6 Análises Estatísticas

As análises de variância foram realizadas seguindo o modelo fatorial 4×3 . Equações de regressão por polinômios ortogonais foram ajustadas em função das doses de gesso e as

doses de N foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. Na ausência de interação significativa entre as doses de gesso e de N em cobertura, utilizaram-se as médias das observações e, no caso de interação significativa, realizou-se o desdobramento. Consideraram-se apenas as regressões significativas ao nível de 5%, sendo utilizada como critério para a escolha do modelo, a magnitude dos coeficientes de determinação. Para os atributos de crescimento de raízes, as análises de variância foram realizadas dentro de cada profundidade de amostragem, comparando-se as médias pelo teste de Tukey a 5%. Análises de correlação foram feitas entre atributos de químicos do solo, dependendo da profundidade de amostragem, e atributos avaliados na cultura do milho. Foram utilizados os pacotes estatísticos SISVAR, versão 5.1, para as análises de variância e de regressão, e SAEG, versão 9.0, para as análises de correlação.

3.1.2 Experimento em Colunas de Solo

O experimento foi realizado com o mesmo solo da área experimental utilizado no experimento de campo (Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa), em colunas indeformadas sob condições controladas.

3.1.2.1 Coletas das Colunas Indeformadas de Solo

Colunas indeformadas de solo foram coletadas em outubro de 2010, em um dos corredores da área experimental no campo. Retiraram-se 20 colunas de solo por meio de tubos de poli-cloreto de vinila (PVC), com 0,1 m de diâmetro. Antes da coleta, foi passado vaselina e lixou-se o interior dos tubos visando criar atrito para evitar o escorrimento lateral. A coleta foi realizada com a adaptação de uma ferramenta em forma de broca ao motor hidráulico do trator, a qual foi capaz de alocar o solo de maneira indeformada nas colunas de PVC, até a profundidade de 0,5 m (Figura 5). Após a coleta, os tubos foram conduzidos para o campus da Universidade Estadual de Ponta Grossa.



FIGURA 5. Coleta de colunas indeformadas de solo na área experimental, por meio do uso de uma rosca hidráulica.

3.1.2.2 Localização e Montagem do Experimento

O experimento foi realizado em ambiente protegido sob condições controladas, no campus da Universidade Estadual de Ponta Grossa, cujas coordenadas geográficas de referência são 25°05'25" de latitude sul e 50°06'12" de longitude oeste, e altitude de 905 m.

As colunas de solo foram dimensionadas para terem 0,5 m de solo, sendo que na base de cada coluna foi colocada uma rede para evitar deslocamento do solo. As colunas foram seladas com um CAP de PVC, onde se instalou uma mangueira para a condução do volume de água lixiviado até um coletor, o qual foi vedado para impedir infiltração externa. As colunas foram acondicionadas em ambiente protegido da ocorrência de chuvas (Figura 6).



FIGURA 6. Colunas de solo em ambiente protegido.

3.1.2.3 Delineamento Experimental

O delineamento experimental empregado foi em blocos completos ao acaso, em esquema fatorial 2×2 , com 5 repetições. Os tratamentos foram constituídos de duas doses de gesso, G_0 e G_1 (0 e 10 t ha^{-1}), e duas doses de $\text{N-NH}_4\text{NO}_3$, N_0 e N_1 (0 e 180 kg ha^{-1}). O gesso, foi aplicado no momento da instalação do experimento, no dia no 3 de novembro de 2010. As doses de gesso e de N foram estabelecidas em conformidade com os resultados obtidos no experimento de campo. A dose 10 t ha^{-1} de gesso foi a calculada para elevar a saturação por bases a 50% no perfil do solo. A dose de 180 kg ha^{-1} de N foi mais alta do experimento de campo e utilizada com a finalidade de proporcionar adequado suprimento de N para o desenvolvimento das plantas.

3.1.2.4 Semeadura e Adubação

A semeadura do milho nas colunas de solo foi realizada no dia 15 de novembro de 2010. Quatro sementes do híbrido DKB 240YG foram colocadas para germinar e, após a emergência, foi efetuado desbaste, mantendo-se uma planta de milho por coluna. No mesmo dia da semeadura, foi realizada a adubação de base, com 45 kg ha^{-1} de N, 112 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 60 kg ha^{-1} de K_2O . A cobertura nitrogenada com 180 kg ha^{-1} de N, foi realizada 10 dias após a emergência das plântulas. Destaca-se que tanto o híbrido como a adubação de base empregados no experimento em colunas de solo foram os mesmos utilizados no experimento de campo.

3.1.2.5 Manejo da irrigação

Logo após a aplicação de gesso, as colunas de solo receberam diariamente irrigação equivalente a 10 mm de chuva, durante sete dias, até a semeadura do milho. Da semeadura até a germinação, foram empregados 5 mm ao dia. Após a germinação até dois dias antes do corte das plantas de milho, foram novamente empregados 10 mm diariamente. A quantidade total de água aplicada via irrigação foi de 470 mm desde a aplicação de gesso na superfície, e de 400 mm a partir da semeadura do milho. O cálculo da quantidade de água foi baseado na área do tubo, e a irrigação foi realizada com água deionizada por gotejo com o auxílio de pipetas, de forma a evitar a ocorrência de encharcamento na superfície do solo e, consequentemente, de escorrimientos laterais do fluxo d'água nas bordas dos tubos.

3.1.2.6 Avaliações

As plantas de milho crescidas nos tubos foram cortadas no dia 27 de dezembro de 2010, aos 40 dias após a emergência e 54 dias após a aplicação de gesso. As plantas cortadas rente ao solo foram lavadas em água deionizada e colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60°C . A produção de matéria seca da parte aérea foi avaliada e, posteriormente, as amostras foram moídas. Os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn foram determinados de acordo com os métodos descritos em Malavolta et al. (1997). A extração de nutrientes pela parte aérea das plantas foi calculada multiplicando-se a produção de matéria seca pela concentração de nutrientes.

Após o corte da parte aérea das plantas, as colunas de solo foram cortadas em camadas de 0,10 m, visando avaliar os atributos químicos do solo e o crescimento de raízes nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m. As amostras de solo foram retiradas dos tubos com cuidado de modo a não perturbar as raízes, e divididas em duas partes. Uma parte foi imediatamente congelada após a coleta para a determinação de N-NO_3^- .

A outra parte foi colocada para secar em estufa com circulação forçada de ar a 40°C e, após, as amostras foram moídas e passadas em peneira com malha de 2 mm. O pH (CaCl_2), a acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$), e os teores de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} , K^+ e P (Mehlich 1) foram determinados conforme os métodos descritos em Pavan et al. (1992). O S-SO_4^{2-} foi determinado por meio de extração com solução acetato de amônio 0,5 mol L^{-1} em ácido acético 0,25 mol L^{-1} (Cantarella e Prochnow, 2001). O N-NO_3^- foi extraído conforme Cantarella e Trivelin (2001), e determinado pelo método FIA. Após o corte das plantas, os tubos foram serrados em camadas de 0,10 m para a realização da amostragem de solo, sendo posteriormente lavadas com água em peneira de malha de 0,5 mm para a dispersão do solo e separação das raízes. O comprimento de raízes foi avaliado pelo método proposto por Tennant (1975) e o raio médio e a superfície radicular de acordo com Schenk & Barber (1979).

O volume da solução lixiviada nos coletores foi medido e os teores de N-NO_3^- , P, K, Ca, Mg e S-SO_4^{2-} presentes na solução foram determinados. As análises de N-NO_3^- foram realizadas pelo método FIA e de P, K, Ca, Mg e S de acordo com os métodos descritos em Malavolta et al. (1997).

3.1.2.7 Análises Estatísticas

As análises de variância foram realizadas seguindo o modelo fatorial 2×2 . Os efeitos das doses de gesso e de N em cobertura foram comparados pelo teste de Tukey a 5%. Na ausência de interação significativa entre as doses de gesso e de N em cobertura, utilizaram-se as médias das observações e, no caso de interação significativa, realizou-se o desdobramento. Análises de correlação foram feitas entre atributos químicos do solo, em função da profundidade de amostragem, e atributos avaliados nas plantas de milho, e no conteúdo lixiviado. Foram utilizados os pacotes estatísticos SISVAR, versão 5.1, para as análises de variância, e SAEG, versão 9.0, para as análises de correlação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTO REALIZADO NO CAMPO

4.1.1 Alterações nos Atributos Químicos do Solo

4.1.1.1 Acidez Ativa (pH), Acidez Potencial (H + Al) e Acidez Trocável (Al)

As doses de gesso, após 6 meses da aplicação, não influenciaram significativamente a acidez ativa (pH em CaCl_2), a acidez potencial (H + Al) e a acidez trocável (Al) do solo, nas quatro profundidades estudadas (0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) (Tabela 2). Em outros trabalhos realizados em sistema plantio direto também não foi observado efeito da aplicação superficial de gesso no pH do solo (CAIRES et al., 1998; CAIRES, JORIS e CHURKA, 2011; CAIRES et al., 2011). Ernani et al. (2006) analisaram a influência de doses de gesso em sete diferentes tipos de solo e também não constataram alterações no pH dos solos. A ausência de efeito da aplicação de gesso na acidez do solo já era esperada, pois o gesso é um sal neutro, e não um corretivo da acidez, pois tem Ca^{2+} , SO_4^{2-} e CaSO_4^0 como produtos da sua dissociação, os quais não são receptores de prótons (H^+).

As doses de N aplicadas em cobertura também não influenciaram significativamente a acidez ativa (pH em CaCl_2), a acidez potencial (H + Al) e a acidez trocável (Al) do solo, nas quatro profundidades estudadas (0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) (Tabela 3). Sabe-se que a adubação nitrogenada tem grande potencial de acidificar o solo por causa da reação de nitrificação (van RAIJ, 1991). Entretanto, a acidificação do solo é mais intensa quanto maior a dose e a frequência da aplicação de fertilizantes nitrogenados. No presente estudo, a aplicação de uma única dose de até 180 kg ha^{-1} de N não foi suficiente para ocasionar alterações nos componentes da acidez do solo. Aumento da acidez do solo com o emprego de doses mais altas de N foi observado em outros estudos (CAMPOS, 2004; FERNANDES, LIBARDI e da SILVA, 2007; PEREIRA FILHO, 2008).

TABELA 2. Equações de regressão ajustadas para pH (CaCl₂ 0,01mol L⁻¹), acidez potencial (H + Al) e acidez trocável (Al), em diferentes profundidades do solo, considerando as doses de gesso aplicadas em superfície.

$\hat{y}$	Unidade	Profundidade	Equação de regressão
m			
pH em CaCl ₂		0,0-0,1	$\hat{y} = \bar{y} = 5,3$
		0,1-0,2	$\hat{y} = \bar{y} = 5,1$
		0,2-0,4	$\hat{y} = \bar{y} = 4,6$
		0,4-0,6	$\hat{y} = \bar{y} = 4,5$
H+ Al	mmol _c dm ⁻³	0,0-0,1	$\hat{y} = \bar{y} = 59$
		0,1-0,2	$\hat{y} = \bar{y} = 72$
		0,2-0,4	$\hat{y} = \bar{y} = 87$
		0,4-0,6	$\hat{y} = \bar{y} = 92$
Al ³⁺ trocável	mmol _c dm ⁻³	0,0-0,1	$\hat{y} = \bar{y} = 0,0$
		0,1-0,2	$\hat{y} = \bar{y} = 2,6$
		0,2-0,4	$\hat{y} = \bar{y} = 9,9$
		0,4-0,6	$\hat{y} = \bar{y} = 11,5$

TABELA 3. Efeito de doses de nitrogênio (N) aplicadas em cobertura no pH (CaCl₂ 0,01mol L⁻¹), na acidez potencial (H + Al) e na acidez trocável (Al), em diferentes profundidades do solo.

Atributo	Unidade	Profundidade	N em cobertura		
			60	120	180
			----- kg ha ⁻¹ -----		
			m		
pH em CaCl ₂		0,0-0,1	5,4a	5,2a	5,2a
		0,1-0,2	5,2a	5,0a	5,1a
		0,2-0,4	4,6a	4,5a	4,5a
		0,4-0,6	4,5a	4,5a	4,5a
H+ Al	mmol _c dm ⁻³	0,0-0,1	55a	60a	61a
		0,1-0,2	67a	72a	72a
		0,2-0,4	80a	87a	89a
		0,4-0,6	86a	92a	93a
Al ³⁺ trocável	mmol _c dm ⁻³	0,0-0,1	0,0a	0,0a	0,0a
		0,1-0,2	1,5a	2,5a	2,7a
		0,2-0,4	8,5a	10,0a	9,4a
		0,4-0,6	10,6a	11,5a	10,9a

Letras iguais nas linhas não diferem significativamente pelo teste Tukey (P = 0,05).

4.1.1.2 Cálcio, Magnésio, Potássio, Relação Ca/Mg e Saturação por Alumínio

Os teores de Ca^{2+} trocável no solo aumentaram linearmente, em todas as profundidades estudadas, de modo proporcional às doses empregadas, 6 meses após a aplicação de gesso (Figura 7). Somente ocorreu efeito da aplicação de N na camada de 0,4-0,6 m, onde as doses de 120 e 180 kg ha^{-1} de N proporcionaram aumento na concentração de Ca^{2+} comparado com a menor dose empregada (60 kg ha^{-1} de N). Ao longo do perfil do solo (0,0-6 m), a aplicação de gesso promoveu elevação de 7,4, 14,2 e 20,9 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca^{2+} com as doses de 5, 10 e 15 t ha^{-1} , respectivamente.

Efeito de maior magnitude proporcionado pela aplicação de gesso foi observado na camada superficial de 0-0,1 m, em que a maior dose (15 t ha^{-1}) acarretou aumento de 50,7 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca^{2+} . Caires, Feldhaus e Blum (2001) e Caires et al. (2011) também constatarem maior incremento de Ca^{2+} trocável na camada superficial do solo (0-0,1 m), após 8 a 9 meses da aplicação de gesso. No estudo de Caires, Feldhaus e Blum (2001), o aumento de Ca^{2+} trocável na camada superficial do solo (0-0,1 m) com a maior dose de gesso (9 t ha^{-1}) aplicada na superfície foi de 35 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Já, Caires et al. (2011) observaram que a maior dose de gesso empregada (12 t ha^{-1}) resultou em aumento de 48,7 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca^{2+} trocável, muito semelhante ao incremento obtido após 6 meses da aplicação de 15 t ha^{-1} de gesso no presente estudo.

Aumento linear de Ca^{2+} ao longo do perfil do solo tem sido comum em estudos com doses de gesso em sistema plantio direto, desde 8 meses após a aplicação (CAIRES et al., 2011; BLUM et al., 2011), até em avaliações com 43 (CAIRES et al., 2004) e 55 (CAIRES et al., 2006) meses após a adição de gesso. Destaca-se que o efeito residual do gesso no aumento do teor de Ca^{2+} trocável no solo pode ser ainda maior, como é o caso dos resultados obtidos por Caires, Joris e Churka (2011), após 8 anos, e por Toma et al. (1999), após 16 anos.

O aumento na disponibilidade de Ca^{2+} trocável proporcionado pela aplicação de gesso, principalmente na camada superficial do solo (0-0,1 m), teve efeito de redução nos teores de Mg^{2+} e K^{+} trocáveis (Figuras 8 e 9). Isso porque o incremento na concentração de Ca^{2+} pode acarretar o deslocamento de Mg^{2+} e K^{+} nos sítios de troca, deixando esses cátions livres em solução para formar pares iônicos com o sulfato, proveniente do gesso, aumentando a sua mobilidade e movimentação para as camadas mais profundas do solo (ZAMBROSI, ALLEONI e CAIRES, 2007).

Os teores de Mg^{2+} trocável foram influenciados significativamente pela interação entre as doses de gesso e as de N, somente na camada de 0,0-0,1 m (Figura 8). Nessa camada mais superficial do solo, os teores de Mg^{2+} foram reduzidos com as doses de 0 e 15 t ha^{-1} de gesso aplicadas, com as maiores doses de N (120 e 180 kg ha^{-1}).

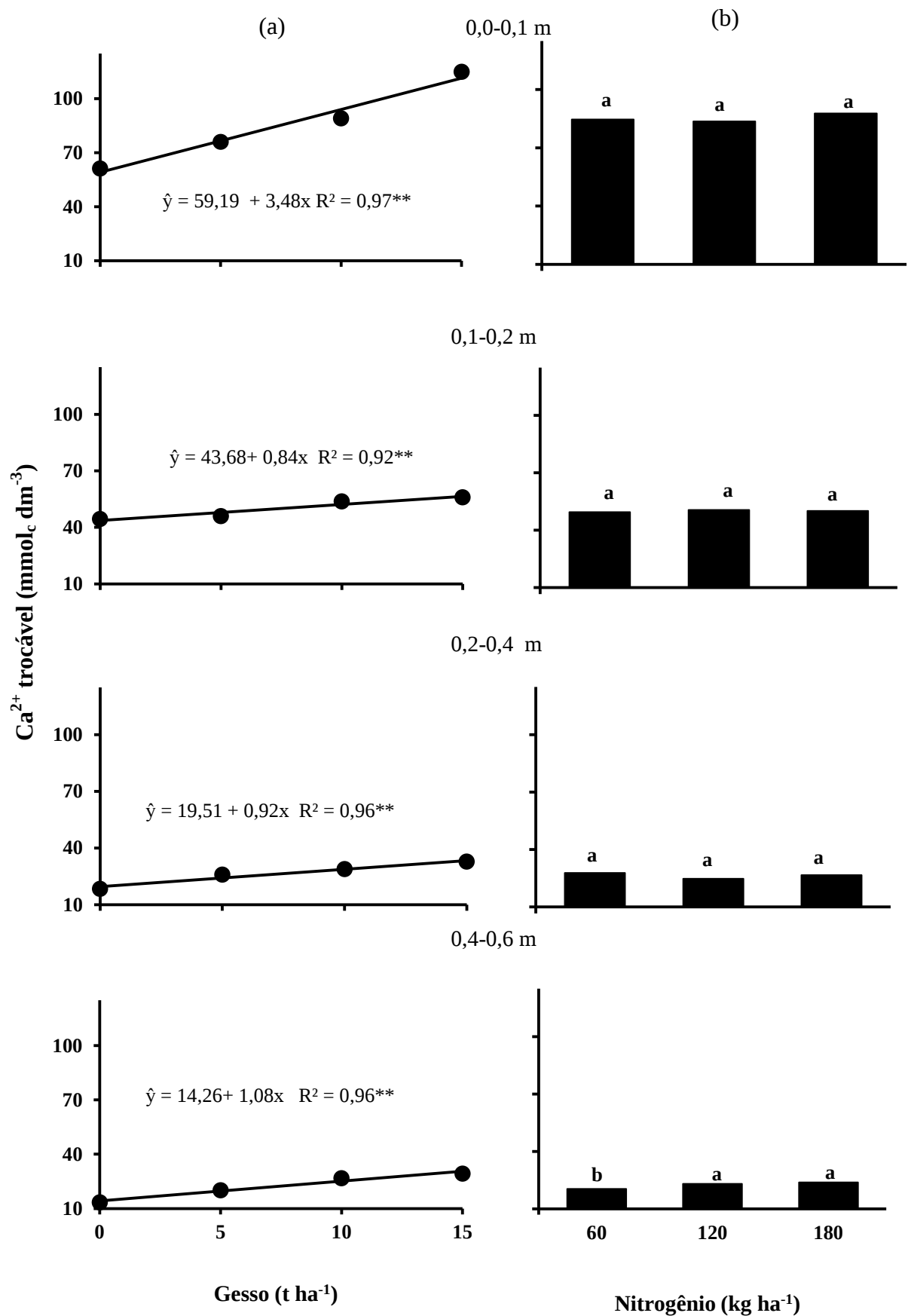


FIGURA 7. Alterações nos teores de Ca²⁺ trocável no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

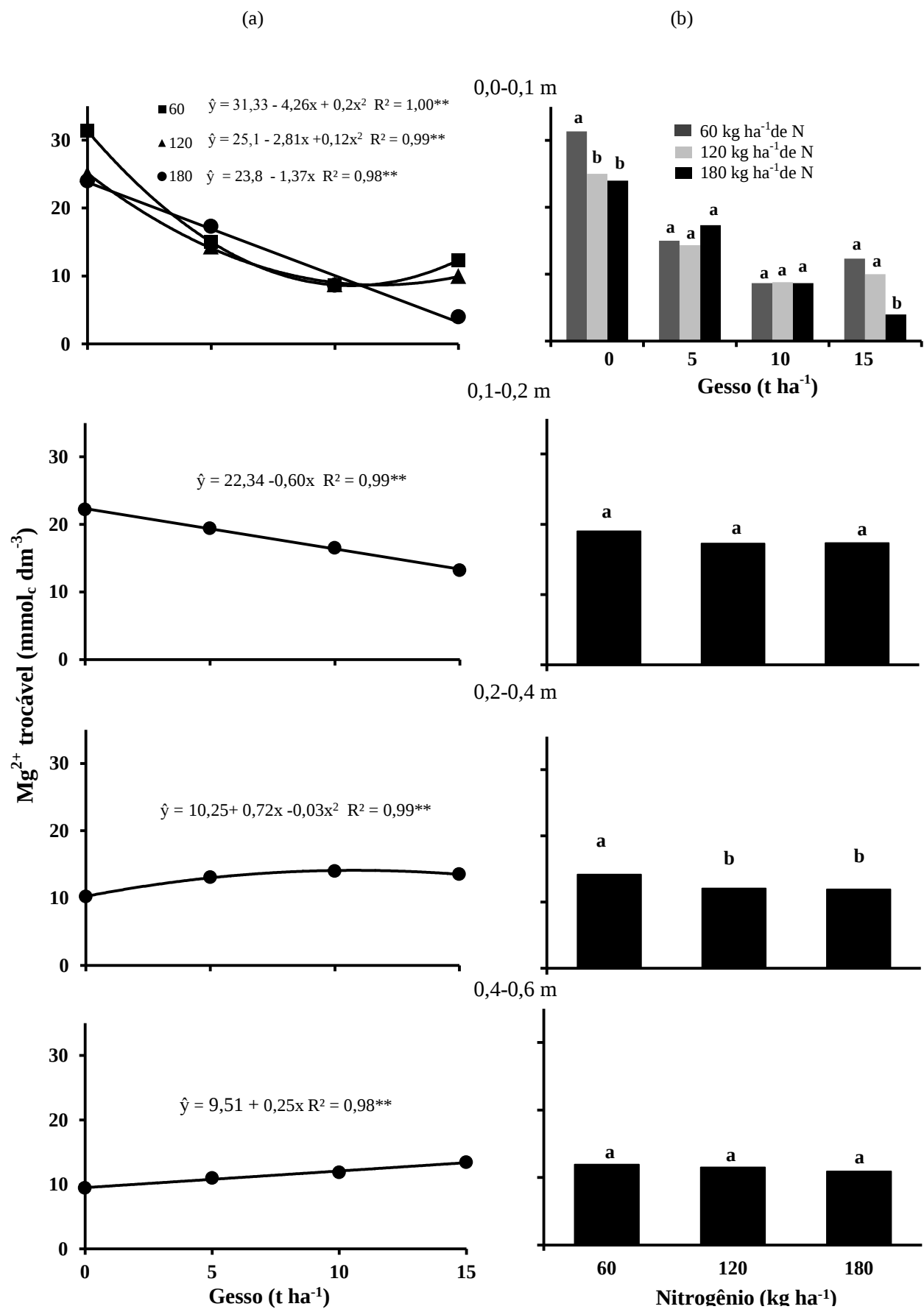


FIGURA 8. Alterações nos teores de Mg^{2+} trocável no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

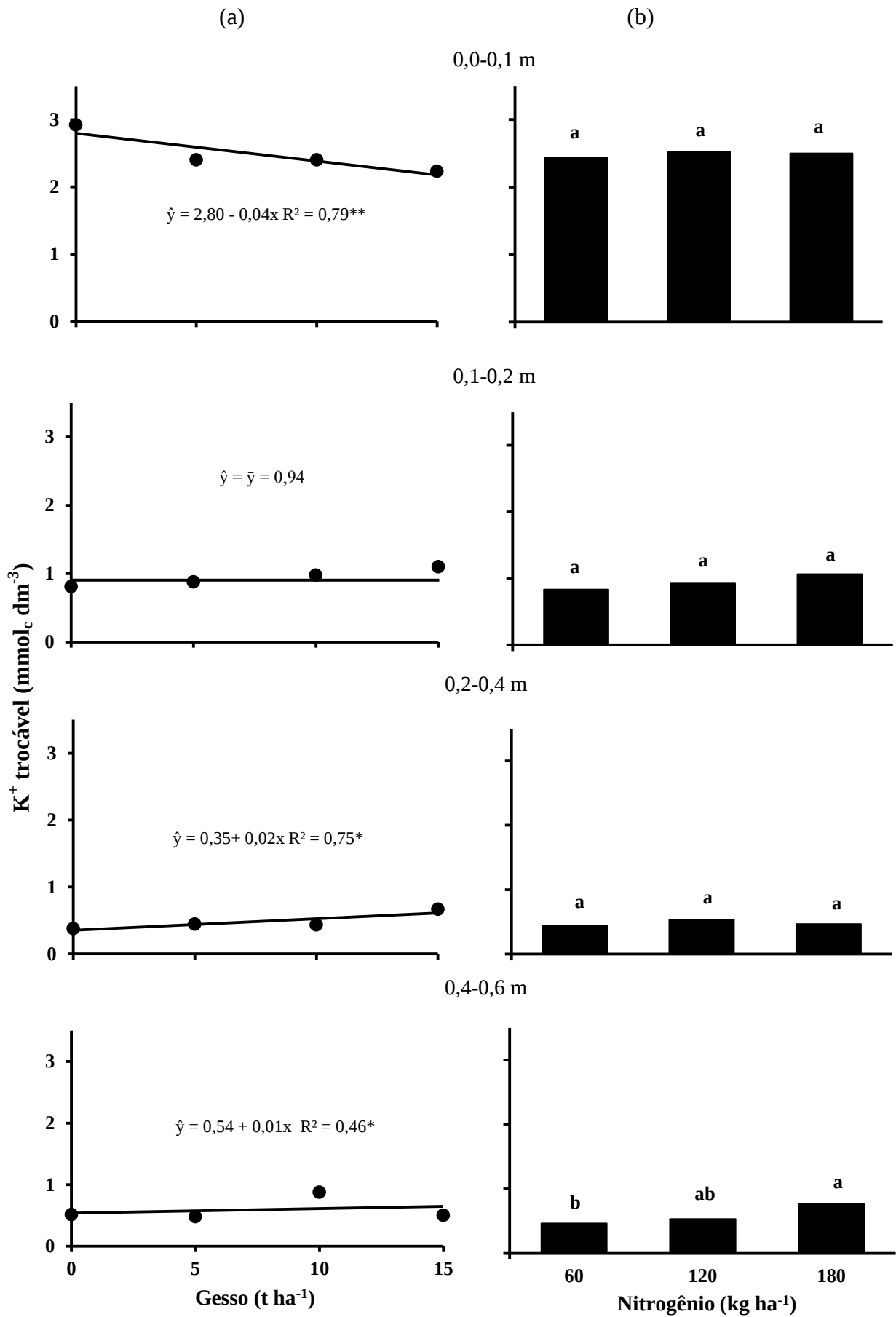


FIGURA 9. Alterações nos teores de K⁺ trocável no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. *: $P < 0.05$ e **: $P < 0.01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

Nas parcelas sem gesso, houve diminuição no teor de Mg^{2+} com a aplicação de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N, e nas parcelas com a maior dose de gesso (15 t ha⁻¹), o teor de Mg^{2+} foi reduzido com a maior dose de N aplicada (180 kg ha⁻¹) (Figura 8). Na camada de 0,1-0,2 m, as doses de gesso reduziram linearmente o teor de Mg^{2+} trocável, independentemente da adubação nitrogenada. Caires et al. (2004, 2011) também observaram redução linear do Mg^{2+} trocável até a profundidade de 0,0-0,2 m em função das doses de gesso aplicadas. Os decréscimos nos teores de Mg^{2+} trocável nas camadas superficiais com as doses de gesso aplicadas resultaram em aumentos no teor do nutriente nas camadas subsuperficiais (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m). Resultados semelhantes mostrando redistribuição do Mg^{2+} trocável no perfil do solo com a aplicação superficial de gesso também foram obtidos por Caires et al. (2002, 2006 e 2011) e por Blum et al. (2011).

Nas parcelas sem gesso, as doses de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N proporcionaram redução de 6 e 7 mmol_c dm⁻³ de Mg^{2+} , respectivamente, em comparação com a menor dose de N (60 kg ha⁻¹), na camada de 0,0-0,1 m (Figura 8). Nas parcelas que receberam 15 t ha⁻¹ de gesso, a aplicação de 180 kg ha⁻¹ de N acarretou uma perda mais acentuada de Mg^{2+} , o que resultou em um comportamento linear do ajuste da regressão das doses de gesso, diferenciando das outras doses de N aplicadas que tiveram redução quadrática de Mg^{2+} com as doses de gesso. Pereira Filho (2008) também constatou redução no teor de Mg^{2+} trocável na camada superficial do solo com a aplicação de N. De maneira semelhante à ocorrida na camada superficial do solo, as maiores doses de N (120 e 180 kg ha⁻¹) proporcionaram menores teores de Mg^{2+} na camada de 0,2-0,4 m. Redução dos teores de Mg^{2+} trocável ao longo do perfil do solo em função das maiores doses de N também foi observada por Silveira (2009). Considerando que o NO_3^- apresenta alta mobilidade no perfil do solo, esse comportamento está relacionado com a movimentação de Mg^{2+} pelo íon NO_3^- proveniente da adubação nitrogenada.

As doses de gesso reduziram linearmente o teor de K^+ trocável na camada superficial do solo (0-0,1 m), e proporcionaram aumento nos teores do nutriente nas camadas do subsolo (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m), independentemente da adubação com N (Figura 9). A movimentação do K^+ ao longo do perfil do solo decorrente da aplicação de gesso também foi observada por Blum et al. (2011) e Caires et al. (2002). A adubação nitrogenada em cobertura na maior dose (180 kg ha⁻¹) proporcionou maior teor de K^+ trocável na camada de 0,4-0,6 m do que na menor dose (60 kg ha⁻¹).

A maior redução de K^+ trocável na camada superficial do solo (0-0,1 m), após 6 meses da aplicação de 15 t ha⁻¹ de gesso, foi de 0,7 mmol_c dm⁻³ (Figura 9). Valor muito

semelhante a esse foi obtido em outros estudos (BLUM et al., 2011; CAIRES et al., 2011), após 8 meses da aplicação de 12 t ha^{-1} de gesso.

É interessante notar que o gesso proporcionou maior movimentação de Mg^{2+} trocável (Figura 8) do que de K^+ trocável (Figura 9) no solo. Esses resultados concordam com os obtidos por Ernani et al. (2006), os quais verificaram que a movimentação de Mg^{2+} foi quatro vezes maior do que a de K^+ no solo com a aplicação de gesso. Uma provável explicação para tal fato seria por causa da adsorção preferencial do K^+ próximo à superfície do solo na camada de Stern relativa ao Mg^{2+} (ERNANI et al., 2006).

O efeito da adubação nitrogenada em cobertura sobre os teores de cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) ocorreu somente com o emprego das maiores doses de N (Figuras 7, 8 e 9). Campos (2004) e Fernandes, Libardi e da Silva (2007) também constataram movimentação de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ no solo em função das maiores doses de N empregadas. Certamente esse efeito está relacionado com presença de maior concentração de NO_3^- proveniente da adubação nitrogenada em doses mais elevadas, tendo em vista que o NO_3^- se movimenta no perfil do solo a partir da formação de pares iônicos com os cátions trocáveis.

As alterações ocorridas nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis em função das doses de gesso e de N aplicadas refletiram na relação Ca/Mg do solo (Figura 10). A relação Ca/Mg foi influenciada significativamente pela interação entre as doses de gesso e de N em cobertura somente na camada superficial do solo (0,0-0,1 m). Nas demais profundidades, apenas as doses de gesso aumentaram linearmente a relação Ca/Mg, independentemente da adubação nitrogenada. O aumento linear no teor de Ca^{2+} trocável ao longo do perfil do solo ocasionado pelas doses de gesso, resultou em aumento linear da relação Ca/Mg em todas as camadas de solo analisadas. Caires et al. (2011) também obtiveram aumento linear da relação Ca/Mg no solo até a profundidade de 0,6 m, após 16 e 30 meses das doses de gesso aplicadas. Em consequência do incremento mais acentuado na concentração de Ca^{2+} trocável e da maior redução de Mg^{2+} trocável, principalmente pelas doses de gesso empregadas, ter ocorrido na camada superficial do solo (0,0-0,1 m), essa camada apresentou os maiores valores da relação Ca/Mg. A interação entre as doses de gesso e de N deu-se em função da redução no teor de Mg^{2+} trocável provocada pela maior dose de N (180 kg ha^{-1}) quando foram aplicadas 15 t ha^{-1} de gesso (Figura 8), condição que elevou a relação Ca/Mg no solo a 29; para as demais doses de N (60 e 120 kg ha^{-1}), na mesma dose de gesso (15 t ha^{-1}), a relação Ca/Mg no solo foi da ordem de 10. Por causa do aumento no teor de Ca^{2+} trocável e da redução no teor de Mg^{2+} trocável que ocorrem na camada superficial do solo com a adição de gesso, os maiores valores de relação Ca/Mg após a aplicação de gesso em solos sob plantio direto têm sido encontrados em camadas da superfície do solo (CAIRES et al., 2011 e CHURKA, 2008).

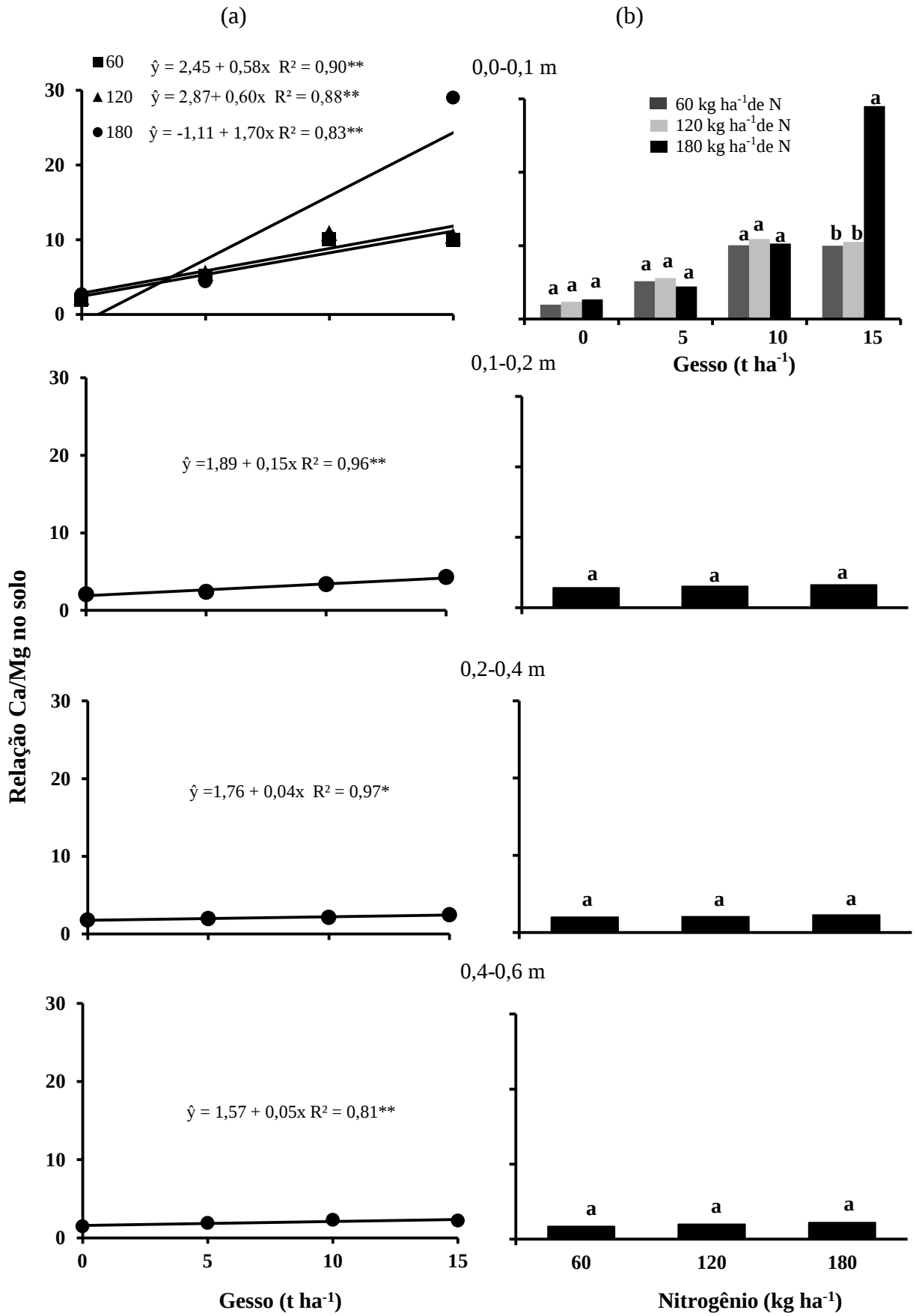


FIGURA 10. Alterações na relação Ca/Mg do solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. *: $P < 0.05$ e **: $P < 0.01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

O solo do presente estudo apresentava baixa acidez nas camadas superficiais, não sendo detectada a presença de Al^{3+} trocável na camada de 0,0-0,1 m e a saturação por Al^{3+} na camada de 0,1-0,2 m foi muito baixa (Figura 11). Como as doses de N em cobertura não influenciaram a acidez e os teores de Al^{3+} trocável no solo (Tabela 3), a adubação nitrogenada não ocasionou alteração na saturação por Al^{3+} , nas diferentes profundidades do solo. Nas camadas do subsolo (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) os valores de saturação por Al^{3+} eram bem mais altos e constatou-se decréscimo linear na saturação por Al^{3+} com as doses de gesso empregadas. Tendo em vista que a aplicação de gesso não alterou os teores de Al^{3+} trocável no solo (Tabela 2), a redução na saturação por Al^{3+} ocorrida nas camadas do subsolo com a adição de gesso foi ocasionada pelo aumento das bases trocáveis, principalmente de Ca^{2+} trocável. Esses resultados concordam com os obtidos por Churka (2008), em que a adição de gesso reduziu a saturação por Al^{3+} em camadas do subsolo (0,2-0,6 m), tendo essa redução sido atribuída ao aumento nos teores de Ca^{2+} trocável, uma vez que o gesso não exerceu influência nos teores de Al^{3+} trocável.

4.1.1.3 Fósforo, Nitrato e Sulfato

Os teores de P no solo (Mehlich 1) aumentaram conforme o modelo linear, nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, e quadrático, na camada de 0,4-0,6 m, em função das doses de gesso (Figura 12). Os maiores incrementos de P no solo com a aplicação de gesso ocorreram na camada de 0,0-0,1 m. Os aumentos de P ocorridos nas camadas subsuperficiais do solo após a adição de gesso, apesar de terem sido significativos, foram de muito pequena magnitude. De acordo com van Raij (2008), o P contido no gesso agrícola, como impureza, pode ser importante na nutrição vegetal no caso de aplicação de doses elevadas de gesso. Resultados muito semelhantes, com aumentos nos teores de P na camada superficial do solo após a aplicação superficial de gesso, também foram encontrados em outros estudos realizados em sistema plantio direto (CAIRES et al., 2003, 2011). As doses de N aplicadas em cobertura não influenciaram o teor de P ao longo do perfil do solo, concordando com os resultados obtidos por Fernandes, Libardi e Silva (2007).

O gesso aplicado em superfície não alterou os teores de NO_3^- no solo, nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,4-0,6 m (Figura 13). A ausência de efeito sobre o teor de NO_3^- nas camadas superficiais do solo é concordante com os resultados obtidos por Kalmabacher et al. (2005), em um estudo de campo realizado na Flórida (EUA).

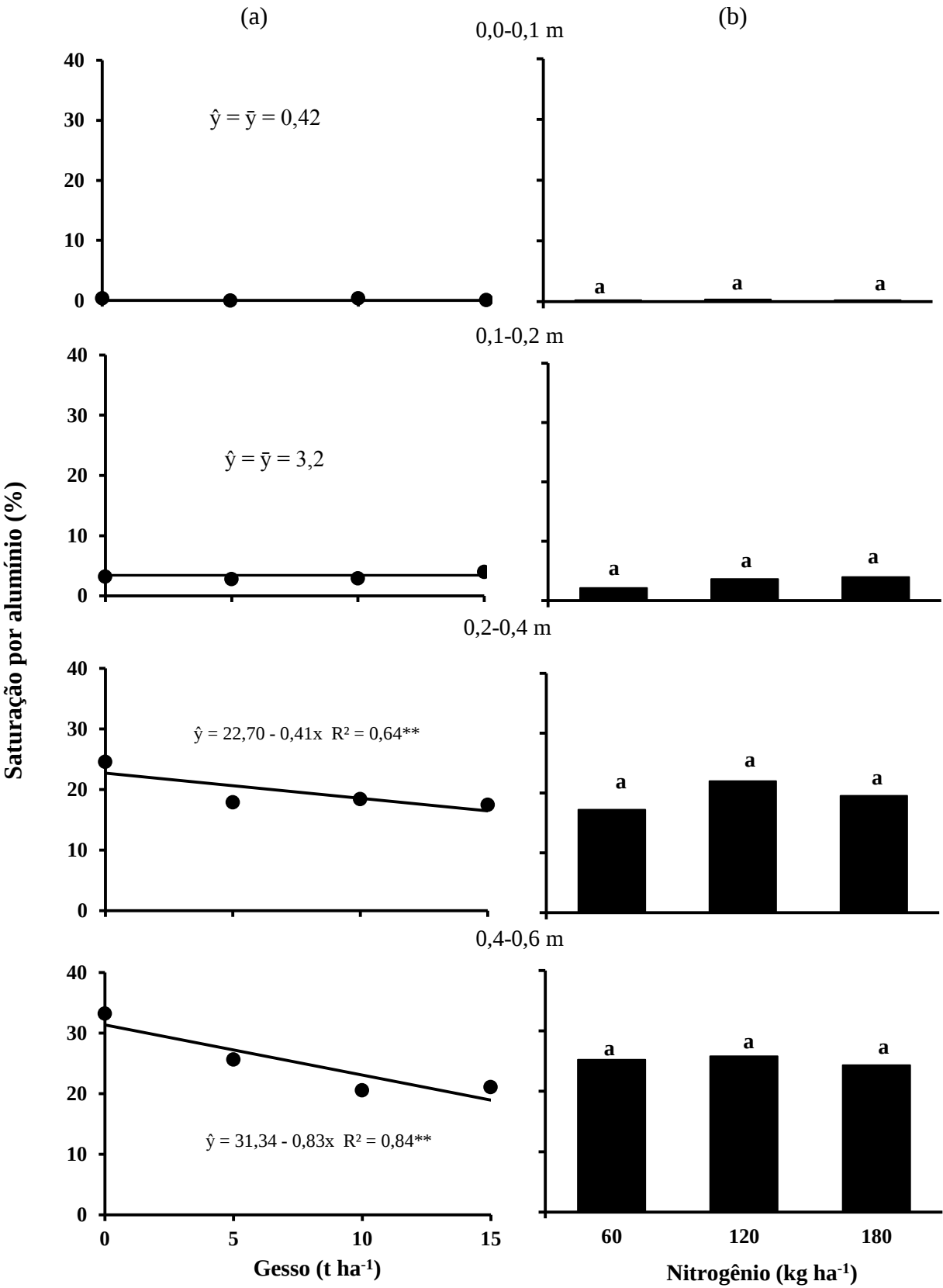


FIGURA 11. Alterações na saturação por alumínio no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0.01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

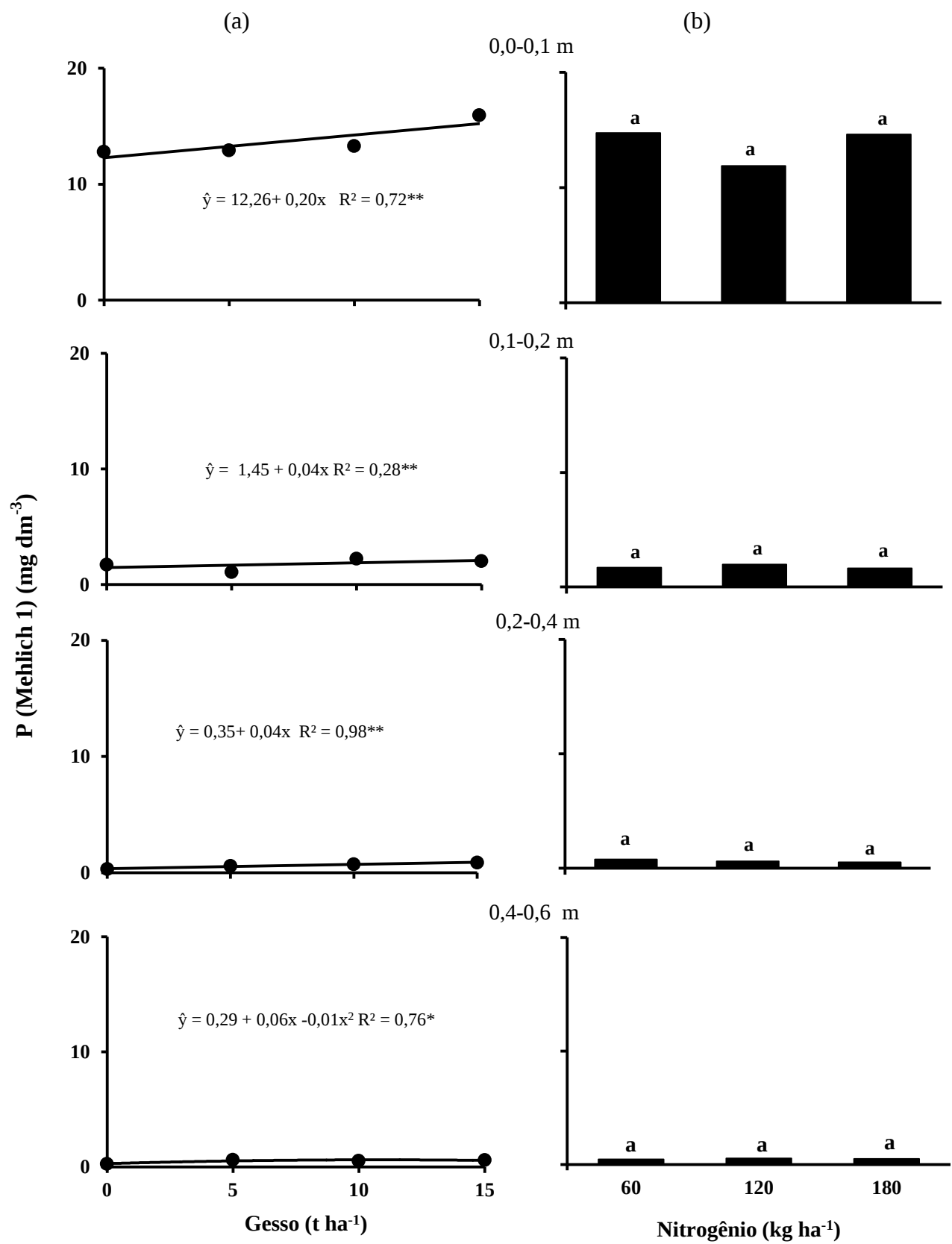


FIGURA 12. Alterações nos teores de P no solo (Mehlich 1), em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

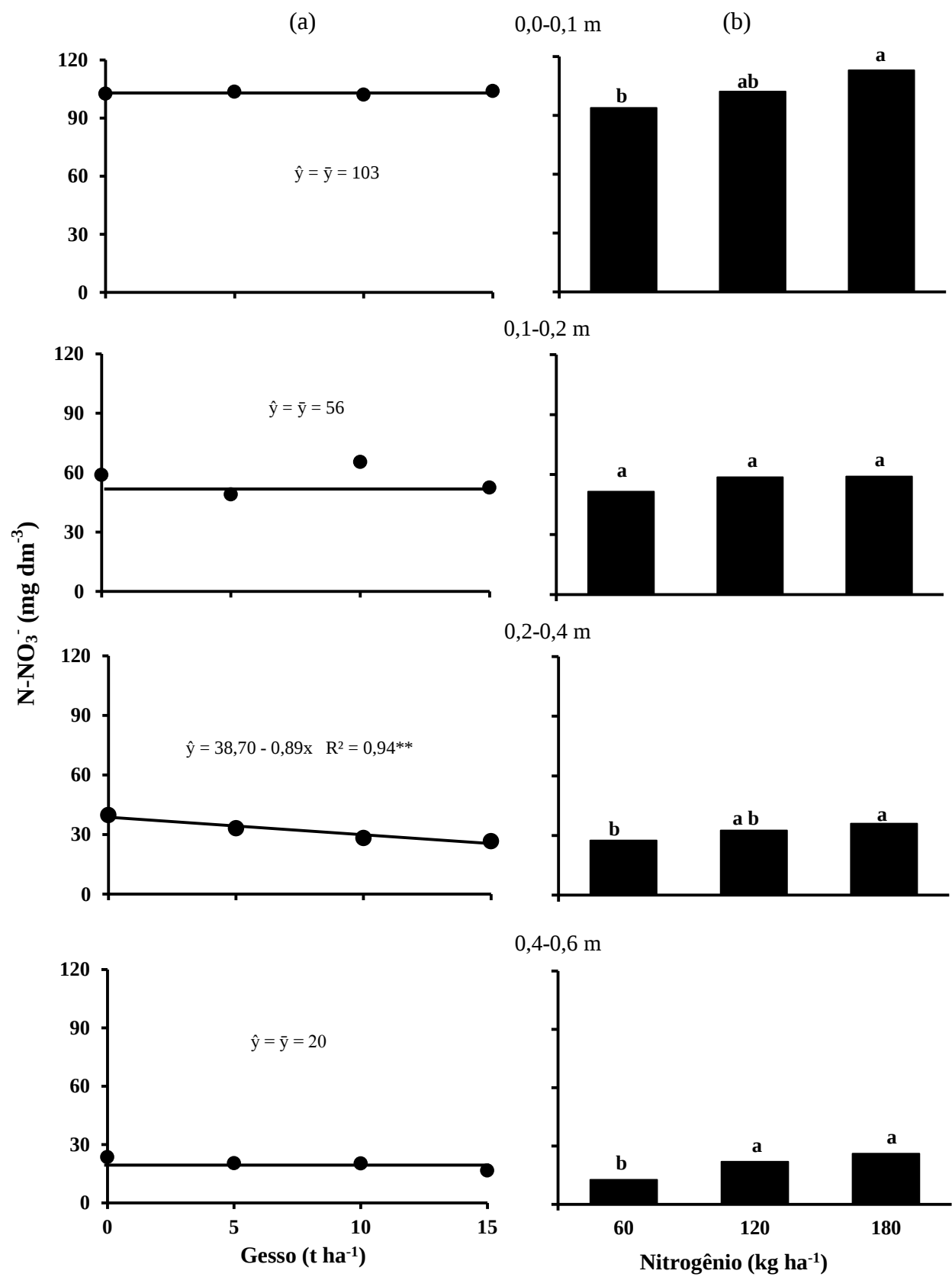


FIGURA 13. Alterações nos teores de N-NO₃⁻ no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

As doses de gesso reduziram linearmente os teores de NO_3^- na camada de 0,2-0,4 m (Figura 13). A maior dose de gesso (15 t ha^{-1}) ocasionou redução de $13,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de NO_3^- nessa camada do subsolo. Souza e Ritchey (1986) também observaram redução de NO_3^- ao longo do perfil de um Latossolo Vermelho, com a aplicação de 6 t ha^{-1} de gesso, e a maior redução de NO_3^- pelo gesso ocorreu na profundidade de 0,40 m.

As doses de N empregadas em cobertura somente não influenciaram o teor de NO_3^- no solo da camada de 0,1-0,2 m (Figura 13). Nas camadas de 0-0,1 e 0,2-0,4 m, o teor de NO_3^- no solo foi maior com a aplicação de 180 kg ha^{-1} de N em relação à dose de 60 kg ha^{-1} de N. Nessas duas camadas de solo (0-0,1 e 0,2-0,4 m), não houve diferença significativa entre os teores de NO_3^- obtidos com a aplicação de 60 ou 120 kg ha^{-1} de N. Na camada de solo mais profunda (0,4-0,6 m), os teores de NO_3^- obtidos com a aplicação de 120 ou 180 kg ha^{-1} de N foram maiores do que o teor de NO_3^- encontrado com a dose de 60 kg ha^{-1} de N. Feldhaus (2006) e Silveira (2009) também observaram maiores teores de NO_3^- no solo com o emprego de doses mais elevadas de N.

Sabe-se que o ânion NO_3^- tem alto potencial de movimentação no solo, ainda mais quando altas doses de N são empregadas, e sob intenso volume de precipitação pluvial (HOFMAN e CLEPUT, 2004). Entretanto, os maiores teores de NO_3^- no solo foram encontrados nas camadas mais superficiais do solo (Figura 13). Considerando a média dos tratamentos, os teores de NO_3^- no solo foram de 103, 56, 32 e 20 mg dm^{-3} , respectivamente nas profundidades de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Batista (2006) constatou que elevadas doses de N não foram totalmente absorvidas pelas plantas, e acrescentou que uma justificativa para o maior teor de NO_3^- na superfície do solo seria a reutilização do NO_3^- que foi aplicado pelos microorganismos do solo. No estudo realizado por Feldhaus (2006), em um Latossolo Vermelho textura média há 30 anos sob plantio direto, os teores de NO_3^- no solo aos 60 dias após a aplicação do N foram maiores na camada superficial do solo, mas aos 280 dias após a aplicação do N, os teores de NO_3^- no solo foram igualmente distribuídos até a profundidade de 0,6 m. O autor ressaltou ainda que foi clara a imobilização do N mineral pela aveia preta que foi cultivada antecedendo a cultura do milho. No presente estudo, a análise de solo foi realizada após o cultivo da sucessão aveia preta-milho. Os resíduos de aveia preta e de palhada de milho que permaneceram na superfície do solo podem ter sido responsáveis pela imobilização do N mineral, fazendo com que, após a mineralização do N orgânico, maiores teores de NO_3^- fossem quantificados na camada superficial do solo. De acordo com Howard e Essington (1998), a imobilização do N mineral em sistema plantio direto é mais acentuada após a adição de resíduos com alta relação C/N (gramíneas), como é o caso da aveia preta e do milho cultivados em sucessão.

Análise de variância revelou interação significativa entre as doses de gesso e de N aplicadas em cobertura para os teores de SO_4^{2-} no solo, dependendo da profundidade de amostragem (Figuras 14 e 15). As doses de gesso aumentaram os teores de S-SO_4^{2-} extraídos com solução de fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (Figura 14) e com acetato de amônio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em ácido acético $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ (Figura 15), em todo o perfil do solo. Aumentos nos teores de sulfato no solo têm sido frequentes nos estudos com a aplicação de gesso em superfície (CAIRES; JORIS e CHURKA, 2011, CAIRES et al., 1998, 2011 e MASCHIETTO, 2009).

Para os dois extratores utilizados, a distribuição do SO_4^{2-} ao longo do perfil do solo variou de acordo com a dose de gesso empregada (Figuras 14 e 15). Com a aplicação de 5 t ha^{-1} de gesso, as maiores concentrações de SO_4^{2-} foram encontradas nas camadas de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Quando foi utilizada a dose de 10 t ha^{-1} de gesso, o teor de SO_4^{2-} teve uma distribuição mais uniforme ao longo do perfil do solo, com tendência de se acumular na camada de 0,4-0,6 m. Por fim, com a dose de 15 t ha^{-1} de gesso, o teor de SO_4^{2-} foi distribuído ao longo do perfil do solo, mas quantificou-se maior concentração de SO_4^{2-} na camada superficial do solo (0,0-0,1 m). Isso indica que, aos 6 meses após a aplicação, o gesso na maior dose empregada (15 t ha^{-1}) ainda estava se dissociando no solo, de uma forma mais intensa que as demais doses de gesso.

A movimentação de sulfato em direção ao subsolo é favorecida pelo maior teor de matéria orgânica, pelo pH mais elevado e pelo mais alto teor de P nas camadas superficiais. Isso porque o maior teor de matéria orgânica gera maior quantidade de cargas negativas, provoca liberação do sulfato adsorvido em condições de pH mais elevado, e o ânion fosfato compete com o sulfato pelos sítios de adsorção (ALVAREZ et al., 2007). Essas condições diminuem a capacidade de adsorção e favorecem a movimentação de S-SO_4^{2-} para o subsolo. Em camadas subsuperficiais, o sulfato pode ser adsorvido aos colóides e aí permanecer por vários anos (CARVALHO e RAIJ, 1997; CAIRES et al., 2006; CAIRES JORIS e SHURKA, 2011; CAIRES et al., 2011).

Quando o SO_4^{2-} do solo foi extraído com a solução de fosfato de cálcio, a interação entre as doses de gesso e de N em cobertura somente não foi significativa na camada de 0,2-0,4 m (Figura 14). Nas parcelas sem gesso, as doses de N não influenciaram os teores de SO_4^{2-} no perfil do solo. Quando o gesso foi aplicado na dose de 5 t ha^{-1} , as maiores doses de N (120 e 180 kg ha^{-1}) proporcionaram maiores teores de SO_4^{2-} do que a menor dose de N (60 kg ha^{-1}) na camada superficial do solo (0,0-0,1 m), e não houve influência significativa das doses de N nas demais profundidades do solo. Na dose de 10 t ha^{-1} de gesso, os teores de SO_4^{2-} foram reduzidos na camada de 0,0-0,1 m e aumentados na camada de 0,1-0,2 m com o emprego das maiores doses de N (120 e 180 kg ha^{-1}). Com a aplicação de 15 t ha^{-1} de gesso,

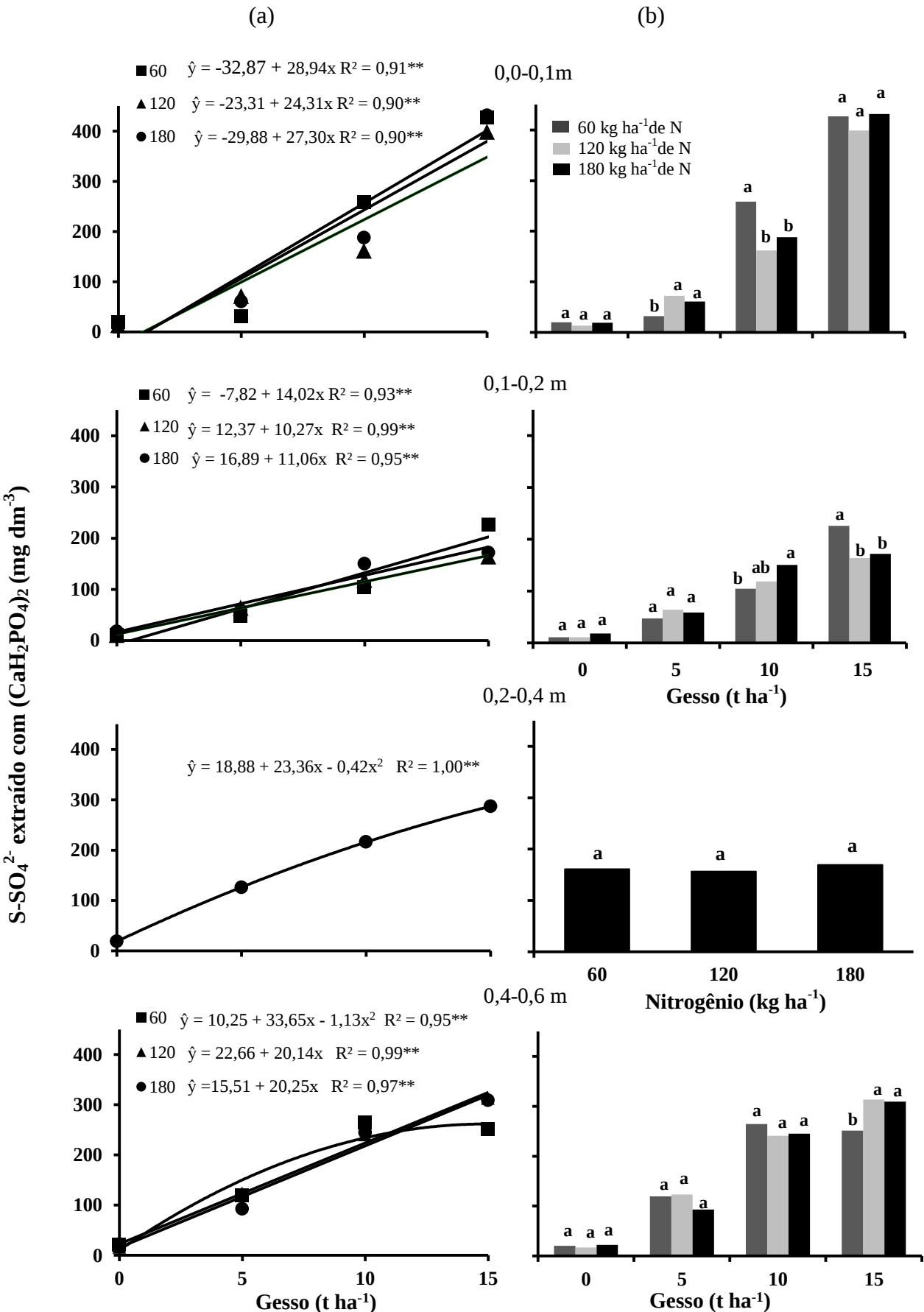


FIGURA 14. Alterações nos teores de S-SO₄²⁻ no solo extraído com solução fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹ (CaH₂PO₄)₂, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

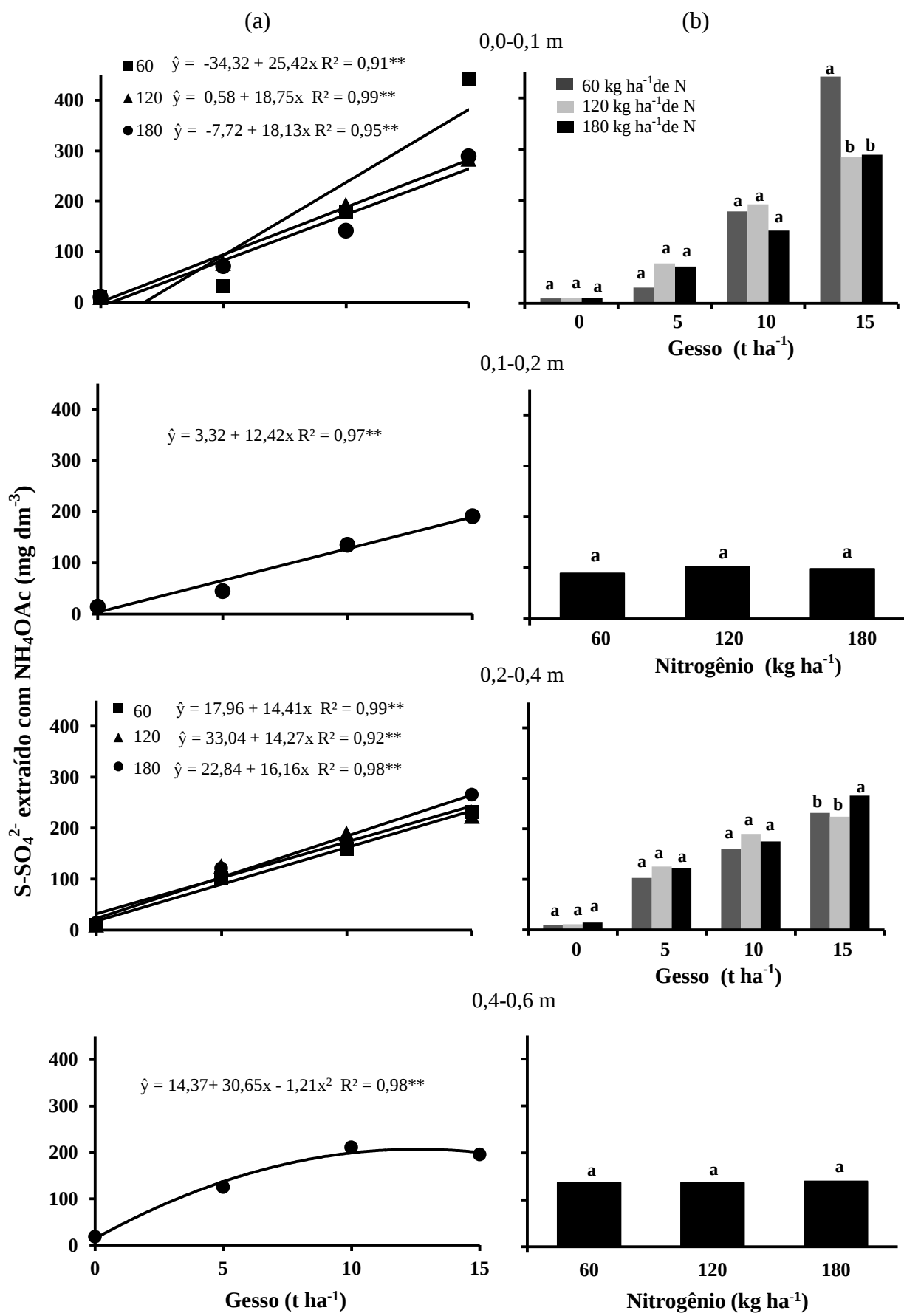


FIGURA 15. Alterações nos teores de S-SO₄²⁻ no solo extraído com solução de acetato de amônio 0,5 mol L⁻¹ em ácido acético 0,25 mol L⁻¹ (NH₄OAc), em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

os teores de SO_4^{2-} foram reduzidos na camada de 0,1-0,2 m e aumentados na camada de 0,4-0,6 m, quando as maiores doses de N (120 e 180 kg ha⁻¹) foram empregadas.

As concentrações de SO_4^{2-} extraídas com a solução de acetato de amônio em ácido acético foram afetadas pela interação entre as doses de gesso e de N em cobertura, somente nas profundidades de 0-0,1 e 0,2-0,4 m (Figura 15). Nas parcelas sem gesso ou com 5 e 10 t ha⁻¹ de gesso, as doses de N não exerceram influência significativa nos teores de SO_4^{2-} no perfil do solo. Quando o gesso foi aplicado na dose de 15 t ha⁻¹, os teores de SO_4^{2-} foram reduzidos na camada superficial do solo (0,0-0,1 m) com o emprego de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N, e houve aumento no teor SO_4^{2-} na camada de solo de 0,2-0,4 m, com a aplicação de N na dose de 180 kg ha⁻¹.

Os resultados de SO_4^{2-} no solo (Figuras 14 e 15) mostraram que na presença de altas doses de gesso, a aplicação de elevadas doses de N na adubação nitrogenada proporcionou maior movimentação de sulfato no perfil do solo, sendo esse efeito mais bem evidenciado quando a extração de SO_4^{2-} no solo foi feita com a solução de fosfato de cálcio do que com a de acetato de amônio em ácido acético. Influência significativa da interação entre a aplicação de N e de S no teor de sulfato no solo também foi encontrada por Silveira (2009). Nesse trabalho, a aplicação de N em alta dose (300 kg ha⁻¹), combinada com as maiores doses de S (45 e 60 kg ha⁻¹), também resultou em maiores teores de sulfato na camada subsuperficial do solo. Resultados diferentes dos obtidos no presente estudo foram encontrados por Campos (2004), em um solo que também tinha elevado teor de argila. Campos (2004) constatou que as maiores doses de N, após 30 e 90 dias da aplicação do fertilizante nitrogenado, ocasionaram maiores teores de sulfato no solo na camada de 0,0-0,2 m, cujo efeito, no presente estudo, foi observado nas camadas do subsolo, quando o gesso foi empregado em elevadas doses. Essa diferença de comportamento do sulfato no solo encontrada no trabalho de Campos (2004) em comparação ao presente trabalho está, provavelmente, relacionada com a precipitação pluvial ocorrida entre a aplicação de N e a amostragem do solo. No estudo de Campos (2004) ocorreram, aproximadamente, 180 e 479 mm de chuvas antes da amostragem do solo, aos 30 e 90 dias após a adubação nitrogenada, respectivamente. No presente estudo, a precipitação pluvial ocorrida entre a adubação de cobertura com N e a coleta de solo foi de 943 mm.

Batista (2006) realizou estudo em vasos com doses de N e de S em pastagens, e constatou redução linear no teor de SO_4^{2-} no solo com o aumento das doses de N. Esse efeito foi atribuído à relação N/S, pois segundo van Raij (1991), quando os valores da relação N/S são altos ocorre imobilização do S mineral. Sendo assim, o fornecimento de N, dependendo da dose, poderia favorecer a imobilização do S no solo por causa do aumento da relação N/S. Esse efeito provavelmente não ocorreu no presente estudo porque a adubação nitrogenada,

com doses de até 180 kg ha^{-1} de N, não interferiu nos teores de sulfato no solo avaliados pelos diferentes procedimentos de extração (Figuras 14 e 15), nas parcelas que não receberam aplicação de gesso.

Apesar de terem sido identificadas pequenas variações nos teores de SO_4^{2-} no solo extraídos com as soluções de fosfato de cálcio (Figura 14) e de acetato de amônio em ácido acético (Figura 15), houve correlação altamente significativa entre esses dois procedimentos de extração para avaliação dos teores de S- SO_4^{2-} disponíveis no perfil do solo (0,0-0,6 m) (Figura 16). De acordo com o ajuste da equação de regressão, maiores teores de sulfato seriam encontrados por meio de extração com fosfato de cálcio do que com acetato de amônio em ácido acético, para concentrações mais baixas de SO_4^{2-} no solo ($< 59 \text{ mg dm}^{-3}$), e maiores teores de sulfato seriam encontrados por meio de extração com acetato de amônio em ácido acético do que com fosfato de cálcio, para concentrações mais altas de SO_4^{2-} no solo ($> 59 \text{ mg dm}^{-3}$). Caires et al. (2011) também constataram alta correlação entre os teores de SO_4^{2-} no perfil do solo (0,0-0,6 m) extraídos com as soluções de fosfato de cálcio e de acetato de amônio em ácido acético, e verificaram ainda que os teores de SO_4^{2-} foram ligeiramente superiores quando extraídos com a solução de fosfato de cálcio. De acordo com os autores, isso aconteceu devido aos elevados teores de argila no perfil do solo, considerando que a solução de fosfato de cálcio extrai mais sulfato adsorvido aos óxidos de Fe e Al, do que aquele ligado à fração orgânica. Isso deve explicar os maiores teores de SO_4^{2-} obtidos com a solução de fosfato de cálcio quando as concentrações de sulfato no solo não eram muito elevadas, tendo em vista que o solo do presente estudo tinha elevado teor de argila ao longo de todo o perfil do solo (Tabela 1). Ribeiro et al. (2001) verificaram que para solos com elevada capacidade de adsorção de sulfato, os extratores que melhor representaram a disponibilidade de SO_4^{2-} no solo foram o acetato de amônio, seguido do fosfato de cálcio. Portanto, os dois extratores utilizados no presente estudo seriam capazes de representar o SO_4^{2-} disponível no solo.

A extração com a solução de fosfato de cálcio ocasionou aumento médio no teor de SO_4^{2-} no solo de 26,8, 11,8, 22,4, e 19 mg dm^{-3} , respectivamente nas camadas de 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, para cada tonelada de gesso aplicada. Considerando as mesmas camadas de solo, o aumento no teor de SO_4^{2-} , quando a extração foi feita com a solução de acetato de amônio em ácido acético, foi de 21,9, 12,4, 18,7 e 12,4 mg dm^{-3} , por tonelada de gesso aplicada. Na média do perfil do solo (0,0-0,6 m), o aumento no teor de SO_4^{2-} , por tonelada de gesso aplicada, foi de 16,1 e 13,0 mg dm^{-3} , respectivamente para os extratores fosfato de cálcio e acetato de amônio em ácido acético. Resultados semelhantes a esses foram obtidos por Caires, Feldhaus e Blum (2001) com aplicação de gesso em sistema plantio direto.

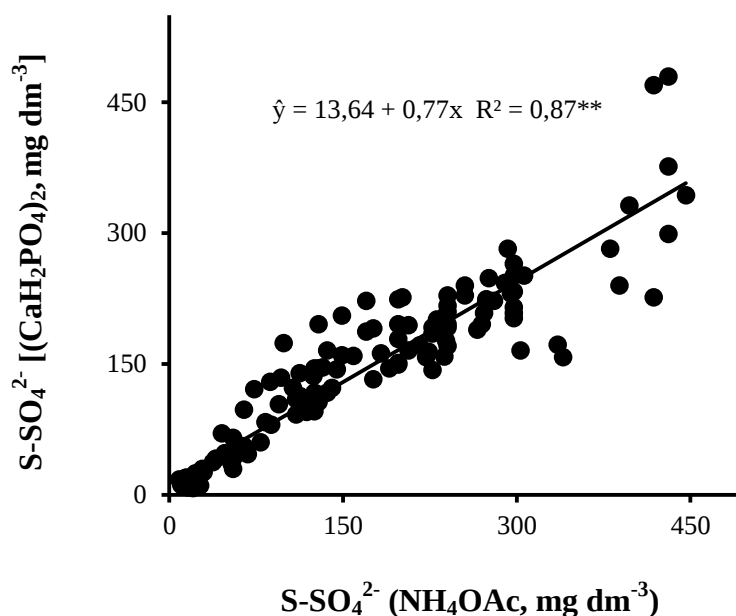


FIGURA 16. Correlação entre os teores de sulfato no solo (0,0-0,6 m) extraídos com solução de fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1} [\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$ e solução de acetato de amônio $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ em ácido acético $0,025 \text{ mol L}^{-1} (\text{NH}_4\text{OAc})$. **: $P < 0,01$

4.1.1.4 Micronutrientes e Metais Pesados

As doses de gesso aplicadas em superfície promoveram redução linear nos teores de chumbo (Pb) no solo, em todas as profundidades estudadas (Figura 17). A adubação nitrogenada em cobertura exerceu influência sobre o teor de Pb no solo somente na camada de 0,2-0,4 m, sendo o teor de Pb no solo foi significativamente menor com as doses de 120 e 180 kg ha^{-1} de N do que com a dose de 60 kg ha^{-1} de N.

Os teores de Cu (Figura 18) e de Mn (Figura 19) no solo foram reduzidos na camada superficial do solo (0,0-0,1 m) com as doses de gesso aplicadas. Nas demais profundidades do solo, a adição de gesso não influenciou as concentrações tanto de Cu como de Mn no solo. A adubação nitrogenada, na maior dose (180 kg ha^{-1} de N), ocasionou maior concentração de Mn do que quando empregada na dose de 60 kg ha^{-1} de N, somente na camada superficial do solo (0-0,1 m) (Figura 18). Os teores de Cu no solo não foram influenciados pelas doses de N aplicadas em cobertura (Figura 19).

Para o teor de Zn no solo (Figura 20) ocorreu interação significativa entre as doses de gesso e de N na camada superficial (0-0,1 m). O desdobramento da interação mostrou que, para as menores doses de N (60 e 120 kg ha^{-1}), as doses de gesso reduziram linearmente o teor de Zn no solo, mas quando a maior dose de N (180 kg ha^{-1}) foi aplicada, o teor de Zn não foi alterado com a aplicação de gesso. Isso porque a dose de 180 kg ha^{-1} de N proporcionou maior teor de Zn no solo quando a maior dose de gesso (15 t ha^{-1}) foi aplicada. Nas demais profundidades do solo, o teor de Zn não foi influenciado pela aplicação de gesso e de N.

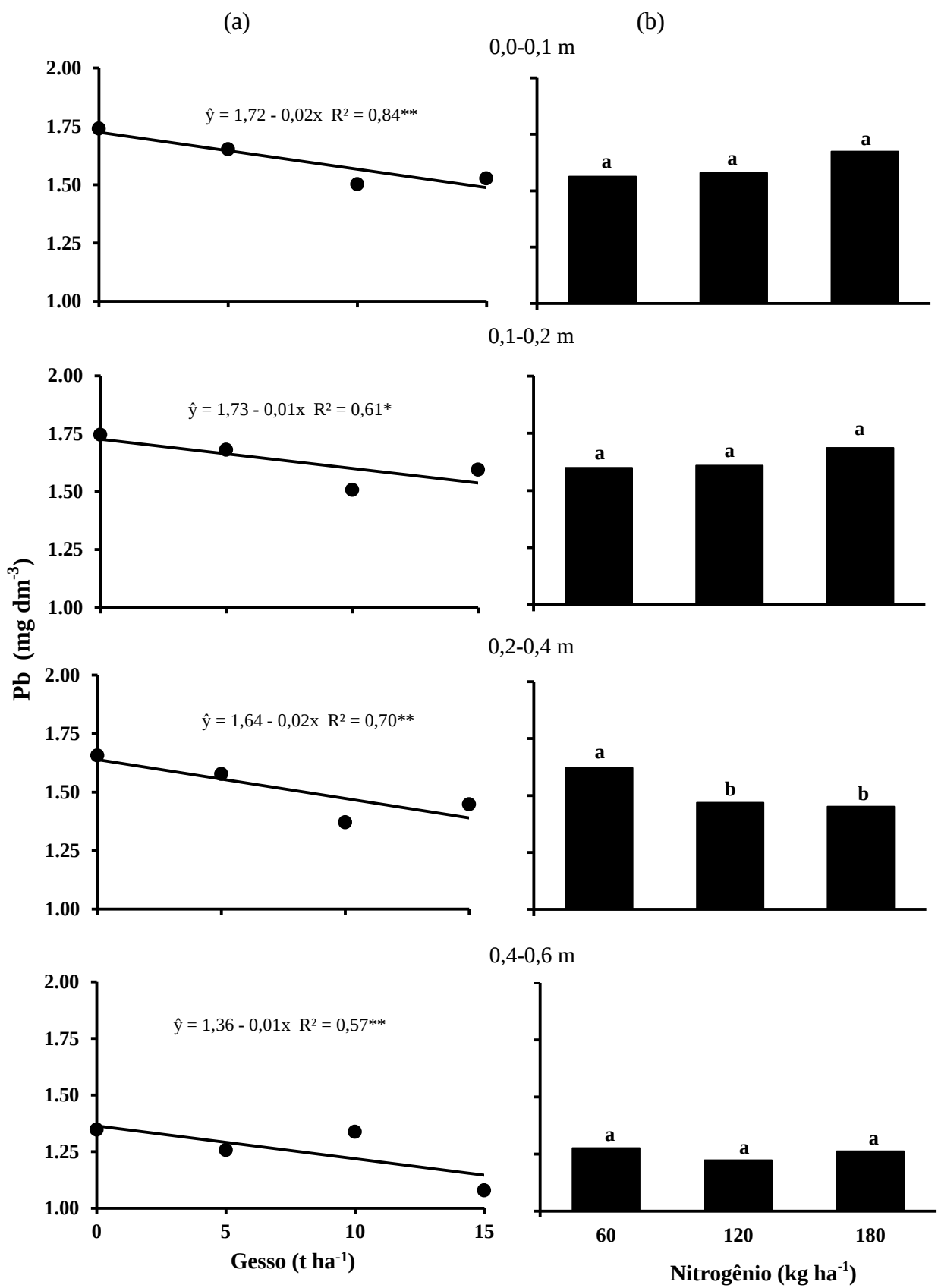


FIGURA 17. Alterações nos teores de Pb no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

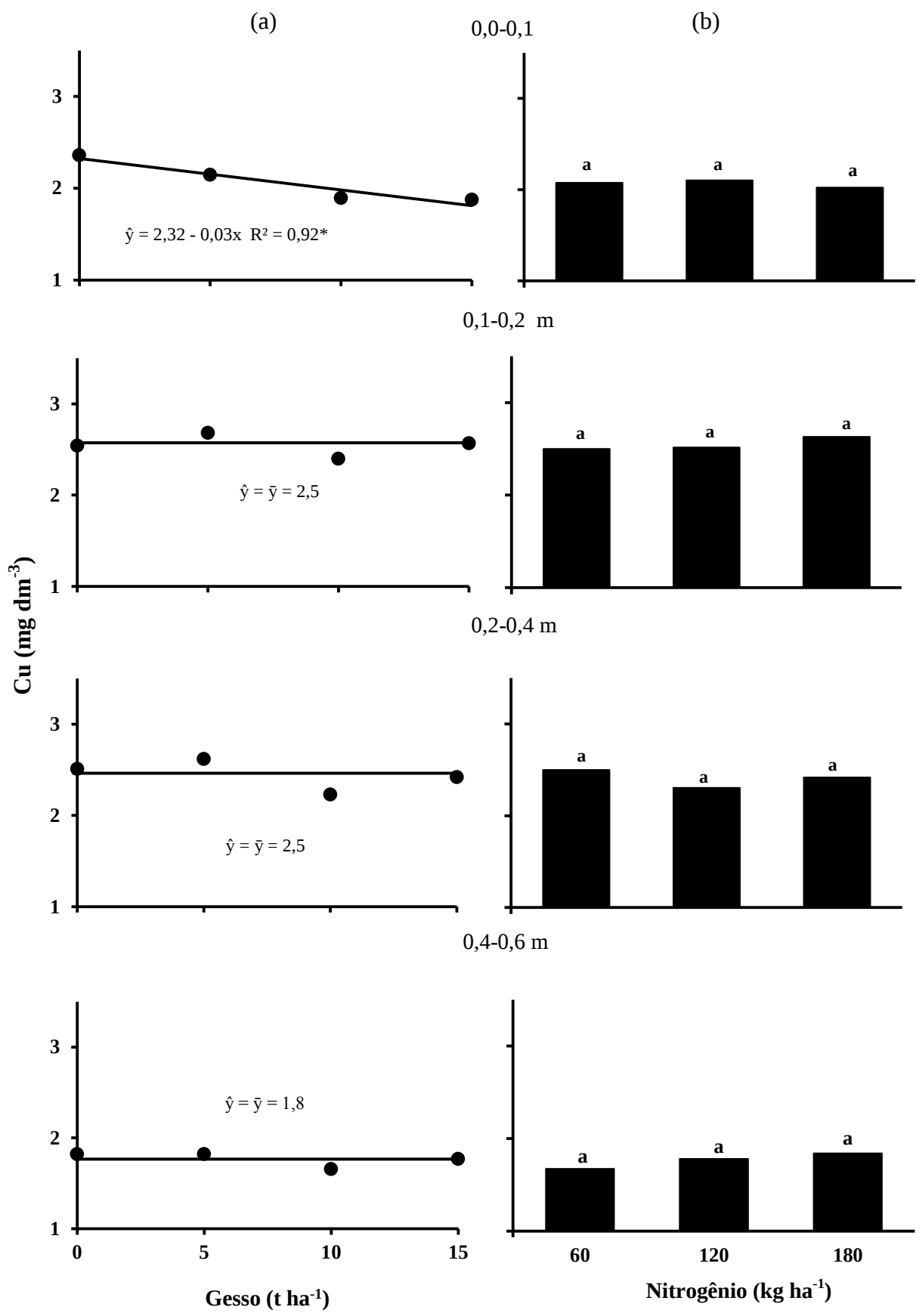


FIGURA 18. Alterações nos teores de Cu no solo em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

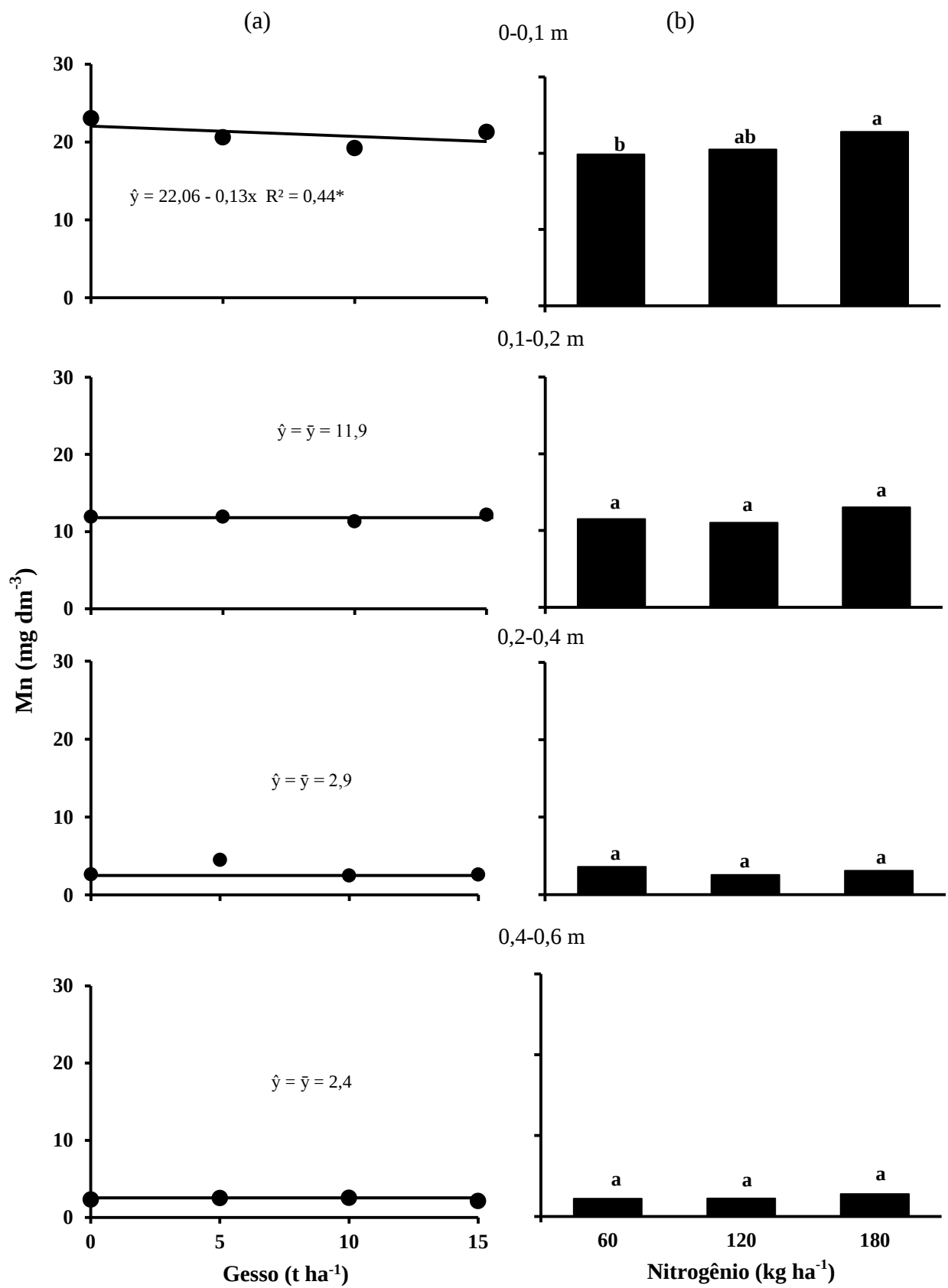


FIGURA 19. Alterações nos teores de Mn no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

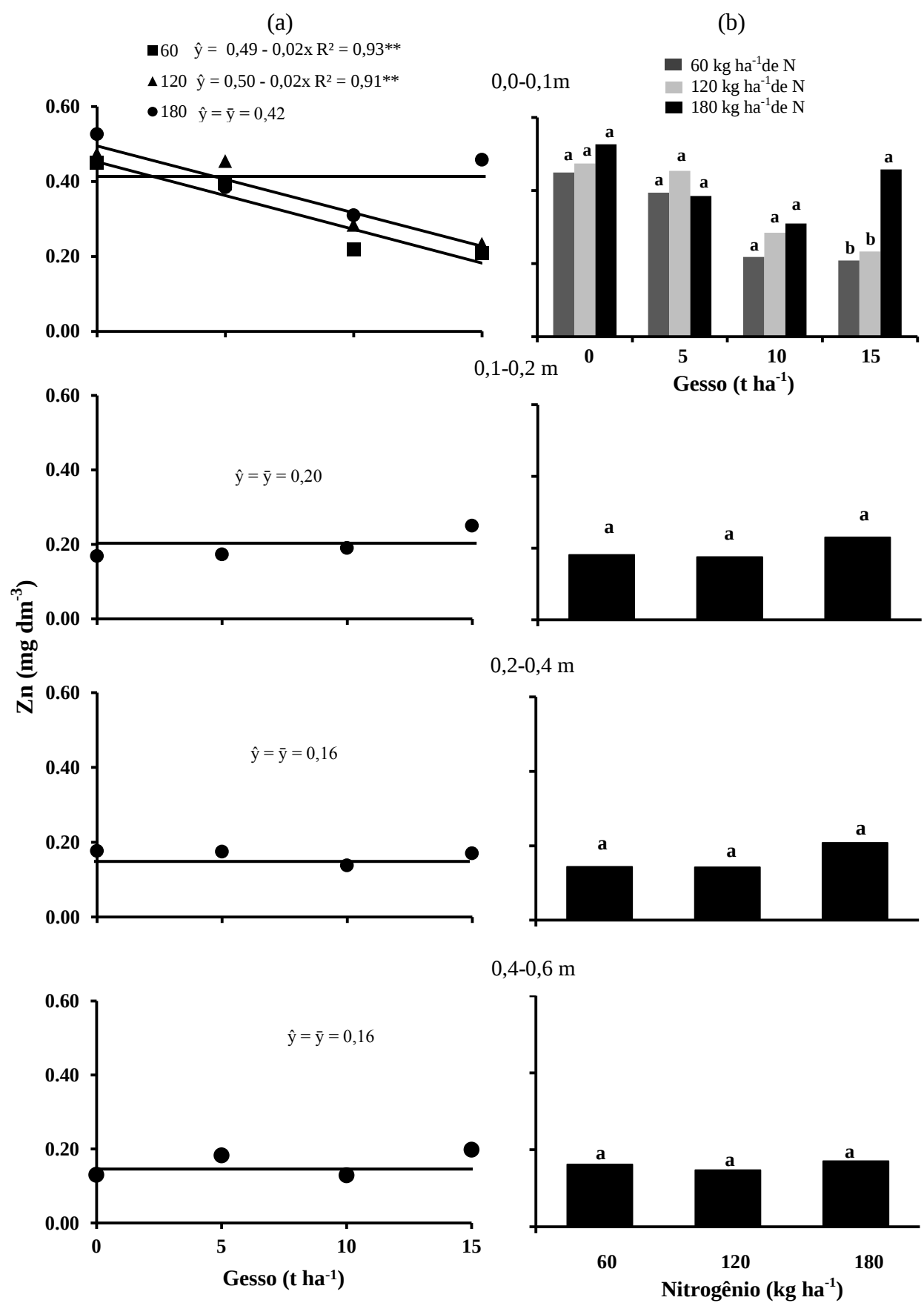


FIGURA 20. Alterações nos teores de Zn no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

As doses de gesso na superfície e de N em cobertura influenciaram as concentrações de Fe no solo somente em subsuperfície (Figura 21). Na camada de 0,2-0,4 m, as doses de gesso empregadas alteraram os teores de Fe no solo conforme o modelo quadrático e não houve influência das doses de N nos teores de Fe no solo. Na camada de 0,4-0,6 m, o teor de Fe no solo foi influenciado pela interação entre as doses de gesso e de N. A interação se deu em função do comportamento do Fe com o emprego de 180 kg ha⁻¹ de N, nas parcelas que receberam 10 e 15 t ha⁻¹ de gesso. Quando foi adicionada a maior dose de N (180 kg ha⁻¹), as doses de gesso aumentaram linearmente as concentrações de Fe no subsolo (0,4-0,6 m), enquanto para as demais doses de N (60 e 120 kg ha⁻¹), a aplicação de gesso não ocasionou alterações no teor de Fe. Somente nas parcelas com 10 e 15 t ha⁻¹ de gesso, a maior dose de N (180 kg ha⁻¹) proporcionou maiores teores de Fe no subsolo (0,4-0,6 m) do que as doses de N mais baixas (60 e 120 kg ha⁻¹).

As concentrações de cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr) e níquel (Ni) no solo não foram alteradas com as doses de gesso e de N aplicadas. Os teores médios de Cd no solo, em mg dm⁻³, foram: 0,0094 (0-0,1 m), 0,0095 (0,1-0,2 m), 0,0095 (0,2-0,4 m) e 0,0095 (0,4-0,6 m); os teores médios de Co no solo, em mg dm⁻³, foram: 0,0151 (0-0,1 m), 0,0084 (0,1-0,2 m), 0,0083 (0,2-0,4 m) e 0,0113 (0,4-0,6 m); os teores médios de Cr no solo, em mg dm⁻³, foram: 0,4011 (0-0,1 m), 0,3456 (0,1-0,2 m), 0,3453 (0,2-0,4 m) e 0,3323 (0,4-0,6 m); e os teores médios de Ni no solo, em mg dm⁻³, foram: 0,1515 (0-0,1 m), 0,1712 (0,1-0,2 m), 0,1311 (0,2-0,4 m) e 0,0986 (0,4-0,6 m). De acordo com Rutherford et al. (1994), alguns elementos podem ser transferidos da rocha fosfática para o gesso, dentre eles o Cd. Segundo van Raij (2008), o Cd é o elemento presente em fosfatos que mais tem sido objeto de preocupação ambiental. Os teores permitidos em solos para Cd, Co, Cr, Ni e Pb são de 3, 35, 150, 70, 180 mg kg⁻¹ de solo, respectivamente, de forma que os valores quantificados no presente estão bem abaixo dos considerados de risco de acordo com CONAMA (2009).

Os resultados obtidos no presente estudo demonstram que o uso de gesso, mesmo em altas doses, não ocasiona nenhum problema ambiental referente aos metais pesados. Pequenas reduções nos teores de Pb e de micronutrientes catiônicos obtidas com a aplicação de gesso podem ter sido decorrentes da presença do ânion sulfato. As reduções de Pb ao longo do perfil do solo, e de Cu nas camadas superficiais, com as doses de gesso aplicadas, podem ter sido ocasionadas pela precipitação de Pb, na forma de PbSO₄, e de Cu, na forma de Cu(OH)₂, como constatado por Ilera et al., (2004). Peacock e Rimmer (2000) mostraram que a aplicação de gesso tende a diminuir as quantidades de Pb, Zn e Cu na solução do solo por aumentar sua adsorção nos óxidos de Fe presentes no solo.

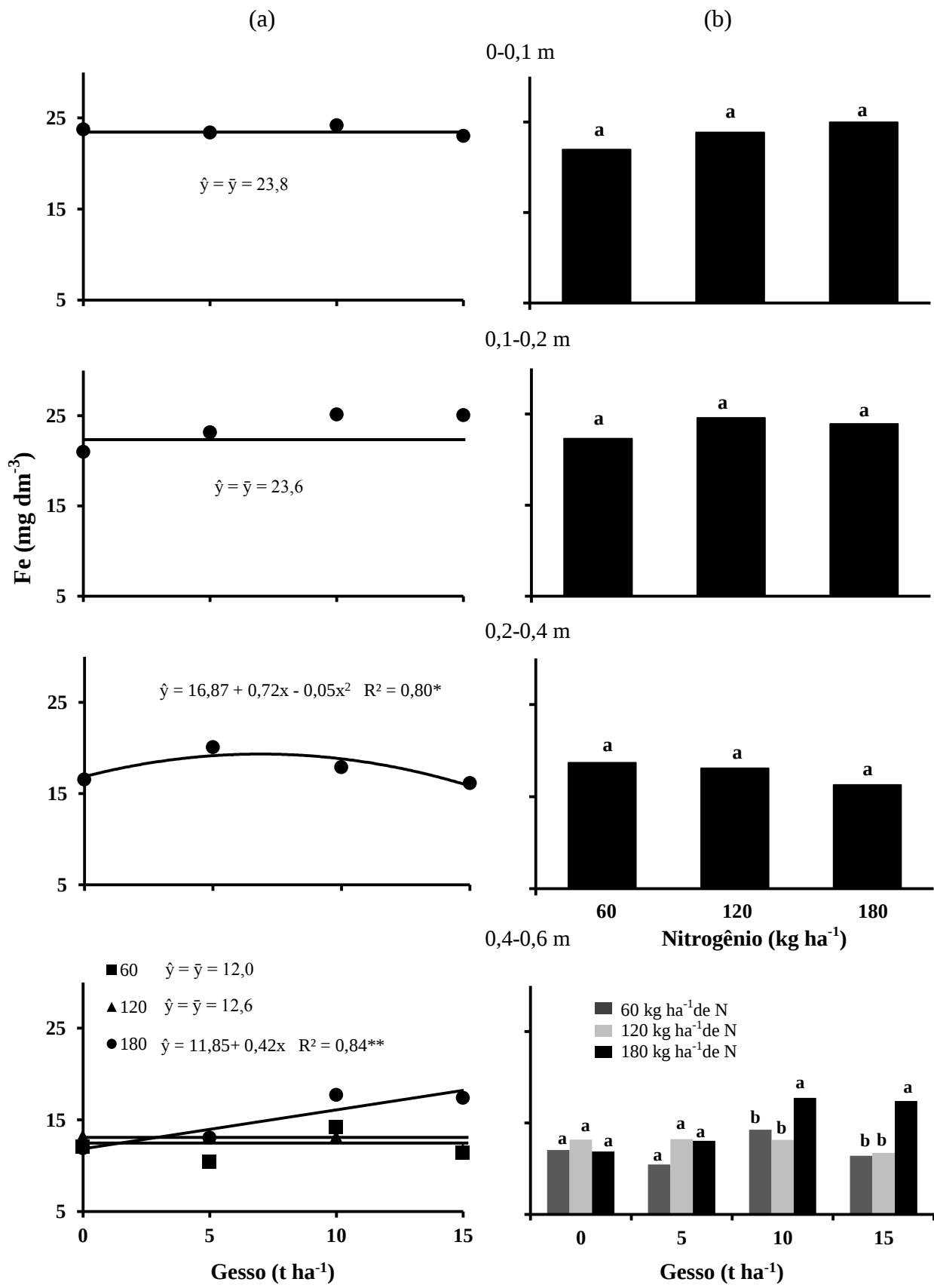


FIGURA 21. Alterações nos teores de Fe no solo, em diferentes profundidades, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

A adubação nitrogenada, em altas doses, pode aumentar os teores de micronutrientes catiônicos em decorrência da acidificação do solo. No presente trabalho, embora a adubação nitrogenada não tenha alterado significativamente o pH do solo (Tabela 3), tal efeito parece ter sido mais evidente para Mn (Figura 19) e Zn (Figura 20).

4.1.2 Atributos de Crescimento Radicular do Milho

O Al é o principal responsável pelos efeitos deletérios da acidez no crescimento radicular das plantas (KOCHINA, PIÑEROS e HOEKNGA, 2005). Apesar de não terem sido observadas alterações significativas nos teores de Al^{3+} trocável ao longo do perfil do solo (Tabelas 2 e 3), a maior disponibilidade de nutrientes catiônicos (Ca^{2+} e Mg^{2+}) tende a reduzir a atividade do Al em solução, amenizando seu efeito maléfico no crescimento do sistema radicular (DA SILVA et al. 2005,2009, SANZONOWICZ, SMYTH e SRAEL, 1998).

Para a densidade de comprimento de raízes de milho (Figura 22) e o comprimento radicular por área até 0,6 m de profundidade (Figura 23), a análise de variância revelou interação significativa entre as doses de gesso (0 e 15 t ha^{-1}) e as doses de N em cobertura.

Quando o N foi aplicado na menor dose (60 kg ha^{-1}), a aplicação de gesso aumentou a densidade de comprimento de raízes de milho (Figura 22) em todo o perfil do solo (0,0-0,6 m). Com a aplicação de 120 kg ha^{-1} de N, observou-se que a adição de gesso somente aumentou a densidade de comprimento de raízes nas camadas mais superficiais do solo (0-0,1 e 0,1-0,2 m). Quando foi aplicada a maior dose de N (180 kg ha^{-1}), a adição de gesso promoveu aumento na densidade de comprimento de raízes somente nas camadas do subsolo (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m).

A aplicação de gesso (15 t ha^{-1}) proporcionou maior comprimento radicular do milho por área, até a profundidade de 0,0-0,6 m, para todas as doses de N empregadas (Figura 23). A interação entre as aplicações de gesso e de N ocorreu porque as duas maiores doses de N (120 e 180 kg ha^{-1}) promoveram maior comprimento radicular do milho do que a menor dose de N (60 kg ha^{-1}), somente quando o gesso não foi aplicado. Com a aplicação de gesso (15 t ha^{-1}), as doses de N não alteraram o comprimento radicular do milho. O efeito mais pronunciado do gesso no crescimento das raízes de milho foi obtido com a dose de 60 kg ha^{-1} de N, sendo que a adição de gesso (15 t ha^{-1}) ocasionou aumento de 76% no comprimento radicular da cultura.

A distribuição do comprimento radicular do milho ao longo do perfil do solo e o raio médio das raízes não foram afetados pelas doses de gesso e de N empregadas. Em média, o comprimento de raízes distribuiu-se na proporção de 48%, na camada de 0-0,1 m, 24%, na

camada de 0,1-0,2 m, 16%, na camada de 0,2-0,4 m, e 12%, na camada de 0,4-0,6 m. Resultados semelhantes foram obtidos em outros estudos realizados em sistema plantio direto (CAIRES et al. 2002; FELDHAUS, 2006 e JORIS, 2011). O raio médio das raízes de milho foi de 0,47 mm, na camada de 0-0,1 m, 0,53 mm, na camada de 0,1-0,2 m, 0,46 mm, na camada de 0,2-0,4 m, e 0,54 mm, na camada de 0,4-0,6 m.

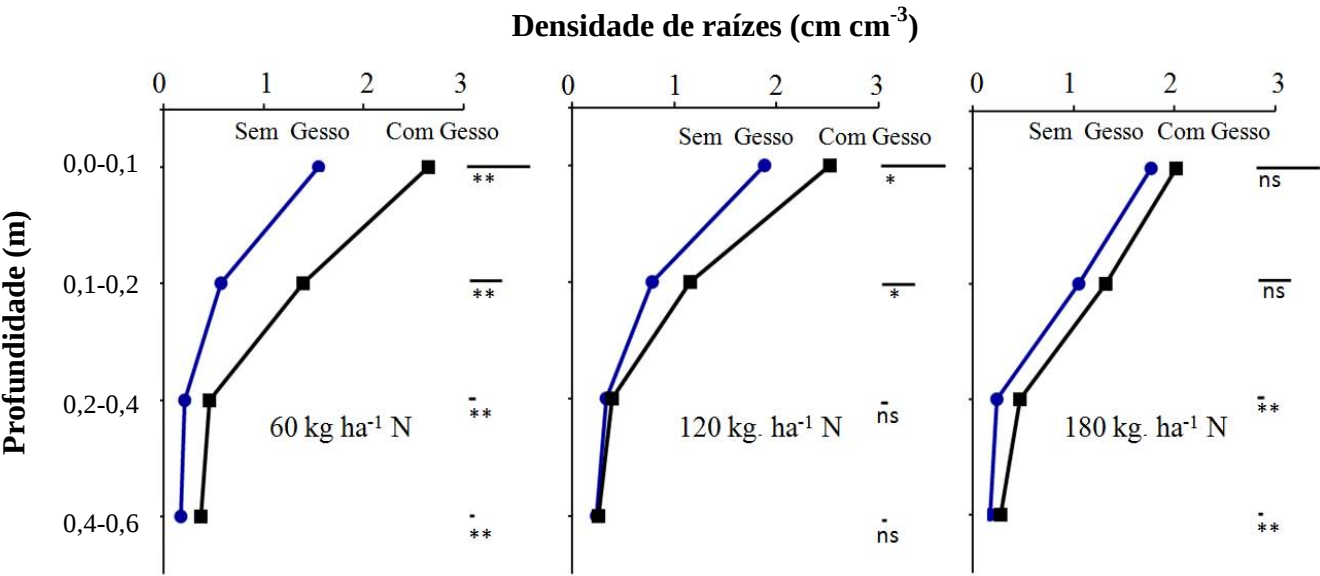


FIGURA 22. Densidade de comprimento de raízes de milho em função da aplicação superficial de gesso (15 t ha⁻¹), considerando as doses de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). ns: não-significativo, *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.

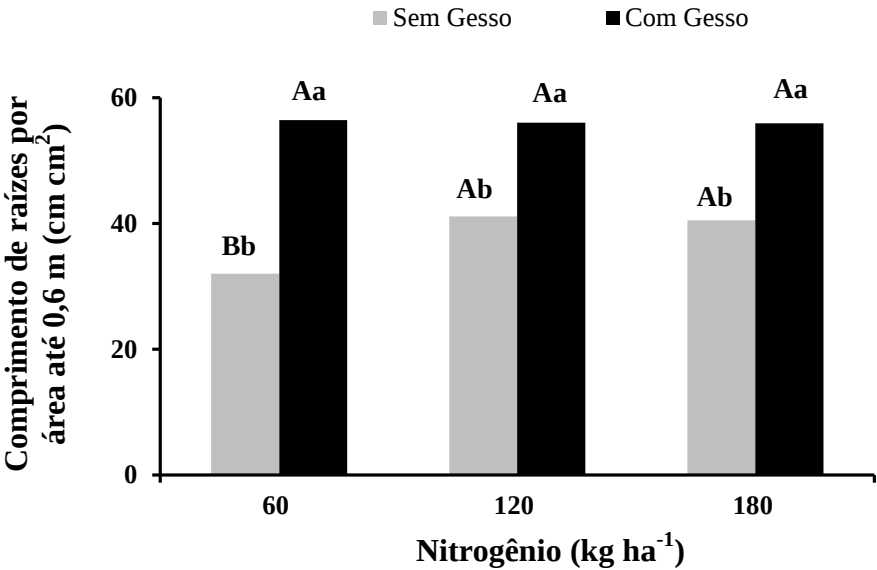


FIGURA 23. Comprimento radicular do milho por área, até a profundidade de 0,6 m, em função da aplicação superficial de gesso (15 t ha⁻¹), considerando as doses de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Letras iguais, maiúsculas para as doses de N e minúsculas para a aplicação de gesso, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

Nas tabelas 4 e 5 são apresentadas as correlações obtidas entre os atributos químicos do solo e a densidade de comprimento de raízes e o comprimento radicular do milho por área, até 0,6 m de profundidade. Os aumentos nos teores de Ca^{2+} , a melhor distribuição do Mg^{2+} , com consequentes alterações na saturação por Ca^{2+} , na saturação por Mg^{2+} e na relação Ca/Mg , bem como a maior disponibilidade de S-SO_4^{2-} , ao longo do perfil do solo, beneficiaram o crescimento do sistema radicular do milho. Destaca-se que a redução na saturação por Al^{3+} no solo, na camada de 0,4-0,6 m, obtida com a aplicação gesso (Figura 11) também se correlacionou significativamente ($P < 0,05$) com a densidade de comprimento de raízes nessa profundidade ($r = 0,74$). Já, o comprimento radicular por área, até a profundidade de 0,6 m, não apresentou correlação significativa com a saturação por Al^{3+} , certamente porque os teores de Al^{3+} trocável eram elevados somente nas camadas do subsolo.

TABELA 4. Coeficientes de correlação linear entre a densidade de comprimento de raízes de milho e os atributos químicos do solo, em função da profundidade.

Profundidade	Ca^{2+} trocável	Mg^{2+} trocável	Saturação por Ca^{2+}	Saturação por Mg^{2+}	Relação Ca/Mg	S-SO_4^{2-}	
						$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	NH_4OAc
m							
0,0-0,1	0,46**	-0,44**	0,50**	-0,48**	0,04ns	0,62**	0,67**
0,1-0,2	0,58**	-0,66**	0,37**	-0,65**	0,77**	0,66**	0,56**
0,2-0,4	0,62**	0,13ns	0,63**	0,12ns	0,42**	0,65**	0,64**
0,4-0,6	0,59**	0,57**	0,54*	0,20ns	0,22ns	0,58**	0,73**

ns: não-significativo e **: $P < 0,01$.

TABELA 5. Coeficientes de correlação linear entre o comprimento radicular do milho por área, até a profundidade de 60 cm, e os atributos químicos do solo.

Profundidade	Ca^{2+} trocável	Mg^{2+} trocável	Saturação por Ca^{2+}	Saturação por Mg^{2+}	Relação Ca/Mg	S-SO_4^{2-}	
						$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	NH_4OAc
m							
0,6	0,80**	-0,59**	0,79**	-0,56**	0,78**	0,85**	0,85**

ns: não-significativo e **: $P < 0,01$.

A maior disponibilidade de Ca^{2+} e de S-SO_4^{2-} causou benefícios ao crescimento radicular do milho, considerando que as correlações de Ca^{2+} trocável e S-SO_4^{2-} disponível com a densidade de comprimento radicular foram significativas em todas as profundidades do solo (Tabela 4) e também com o comprimento de raízes por área até 0,6 m (Tabela 5). Resultados mostrando melhor desenvolvimento radicular das plantas em função de maior disponibilidade de Ca^{2+} no solo têm sido frequentes na literatura (CARVALHO e RAIJ, 1997; DA SILVA et al., 2005, 2008, 2009; ZARDO FILHO, 2008; JORIS, 2011). Da Silva et al. (2009) verificaram que, mesmo na ausência de Al, a maior disponibilidade de Ca^{2+} acarretou em maior crescimento radicular. O melhor desenvolvimento radicular em razão de maior

conteúdo de Ca^{2+} disponível se dá pela importância desse nutriente na estabilidade da parede celular, conferindo maior flexibilidade e expansão das células radiculares (KOCHINA, PIÑEROS e HOEKNGA, 2005).

De acordo com van Raij (2008), em valores baixos de pH, o Ca^{2+} protege as raízes do estresse causado pela acidez. Sanzonowicz, Smyth e Sreael (1998) estudaram o efeito de diferentes concentrações de Ca^{2+} e Al^{3+} , em três valores de pH, no crescimento radicular da soja, e observaram que, mesmo em baixo valor de pH (4,6), o aumento das relações Ca/Al e Ca/H resultou em maior comprimento das raízes de soja. Isso porque o Ca^{2+} trocável reduziu o efeito deletério do Al e do H nas raízes da soja e, dentre as fontes utilizadas no estudo, o CaSO_4 foi a fonte que proporcionou os melhores resultados para o crescimento das raízes.

A redução nos teores e na saturação por Mg^{2+} em superfície (0,0-0,2 m) promoveram maior densidade de comprimento raízes de milho (Tabela 4). O mesmo aconteceu com o comprimento de raízes por área até 0,6 m de profundidade (Tabela 5) que foi beneficiado com a redução de Mg^{2+} , provocada pela aplicação de gesso. Essa melhoria no crescimento das raízes obtida com a redução do Mg^{2+} deve ter sido ocasionada por alterações na relação Ca/Mg do solo, tendo em vista que o comprimento radicular por área, até a profundidade de 0,6 m, esteve significativamente relacionado com o aumento de Ca^{2+} trocável e a redução de Mg^{2+} trocável no solo (Figura 24). Da Silva et al. (2005) observaram redução no comprimento e na emissão de raízes laterais ao elevarem a concentração de Mg^{2+} na solução de 2 para 10 mmol L^{-1} , e relacionaram tal efeito à redução na relação Ca/Ca+Mg que, segundo os autores, acarretou competição entre os cátions. Sendo assim, pode-se concluir que a relação entre os cátions é tão importante quanto os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} para o crescimento radicular.

Efeito oposto do ocorrido na camada superficial do solo foi observado no subsolo, onde o aumento na disponibilidade de Mg^{2+} na camada de 0,4-0,6 m, em função da adição de gesso, promoveu maior densidade de raízes nessa profundidade. Entretanto, nessa camada de solo mais profunda, a relação Ca/Mg não correlacionou-se com a densidade de comprimento de raízes. A provável explicação para esse efeito seria que a maior disponibilidade de Ca^{2+} e Mg^{2+} no subsolo (0,4-0,6 m) resultou em menor toxicidade do Al (CAIRES, 2010), permitindo maior crescimento das raízes de milho. Da Silva et al. (2005), ao trabalharem com uma solução com pH 4,6, constataram que a presença Mg^{2+} proporcionou maior crescimento radicular da soja, em função da diminuição na toxicidade do Al, promovida pelo Mg^{2+} . Isso também pode ter ocorrido no presente estudo, uma vez que o pH (CaCl_2) na camada mais profunda do solo (0,4-0,6 m) era de 4,5.

Uma vez que o Al^{3+} é a principal barreira química para o crescimento radicular, e a adição de gesso foi capaz de promover maior enraizamento do milho em solo com teor tóxico

de Al^{3+} nas camadas subsuperficiais, pode-se inferir que a toxicidade do Al para as raízes foi dependente dos teores de cátions trocáveis, principalmente de Ca^{2+} . Da Silva et al. (2008) constataram que a adição de cátions divalentes diminuiu a quantidade de Al^{3+} nas raízes de soja. Entretanto, os efeitos fisiológicos nas raízes estariam relacionados com cada cátion e sua capacidade em aliviar a toxidez do Al. Grauer e Host (1992) verificaram que o Ca^{2+} foi superior ao Mg^{2+} e este superior ao K^{+} em reduzir a toxidez do Al, mas os três cátions foram capazes de amenizar a toxidez do Al^{3+} . Dessa forma, mesmo sem alterar o teor de Al^{3+} trocável, o gesso foi capaz de promover maior enraizamento das plantas ao amenizar o efeito fitotóxico do Al em decorrência do aumento de cátions no perfil do solo.

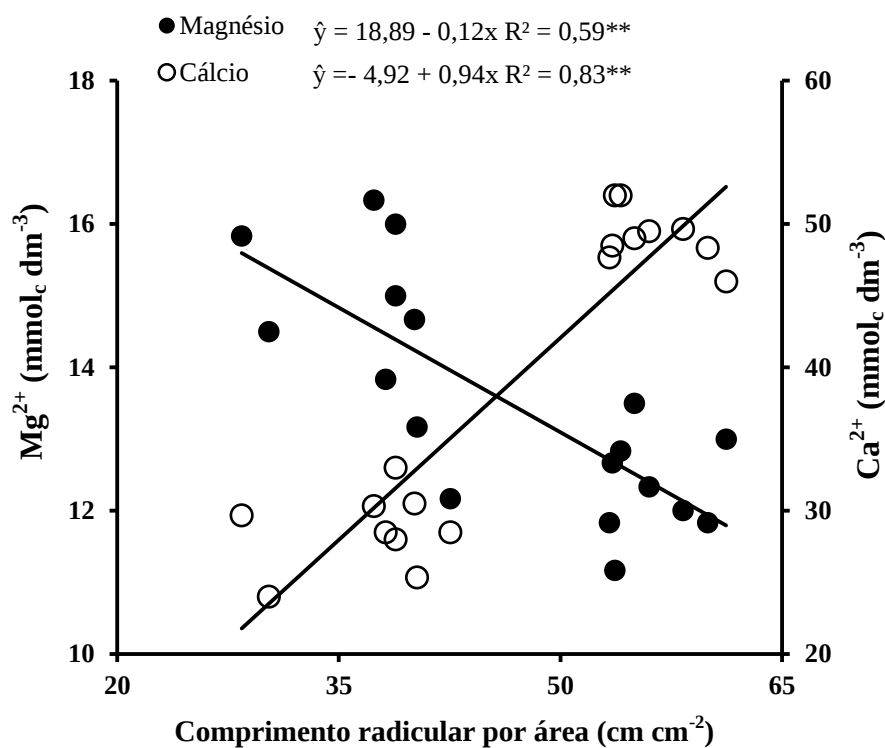


FIGURA 24. Correlações entre o comprimento de raízes de milho por área até a profundidade de 0,6 m, e os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no perfil do solo (0,0-0,6 m). **: $P < 0,01$.

4.1.3 Leitura de Clorofila (Índice SPAD), Área Foliar e Concentração de Nutrientes nas Folhas de Milho

4.1.3.1 Leitura de Clorofila (Índice SPAD) e Área foliar

O índice SPAD detecta a quantidade de luz do espectro infravermelho e vermelho que é transmitida por uma folha. A quantidade de absorção da luz vermelha, quantificada no aparelho, indica a quantidade de clorofila, enquanto que, a quantidade de absorção na região

do infravermelho serve como referência interna para compensar a espessura e teor de umidade da folha (SCHRODER et al., 2000)

Os valores de leitura de clorofila (SPAD) aumentaram linearmente em função das doses de gesso aplicadas e não foram alterados pela aplicação de N em cobertura (Figura 25). Singh et al. (2010) comentam que as medidas obtidas com o clorofilômetro (SPAD), refletem também a quantidade de N mineral disponível na superfície do solo.

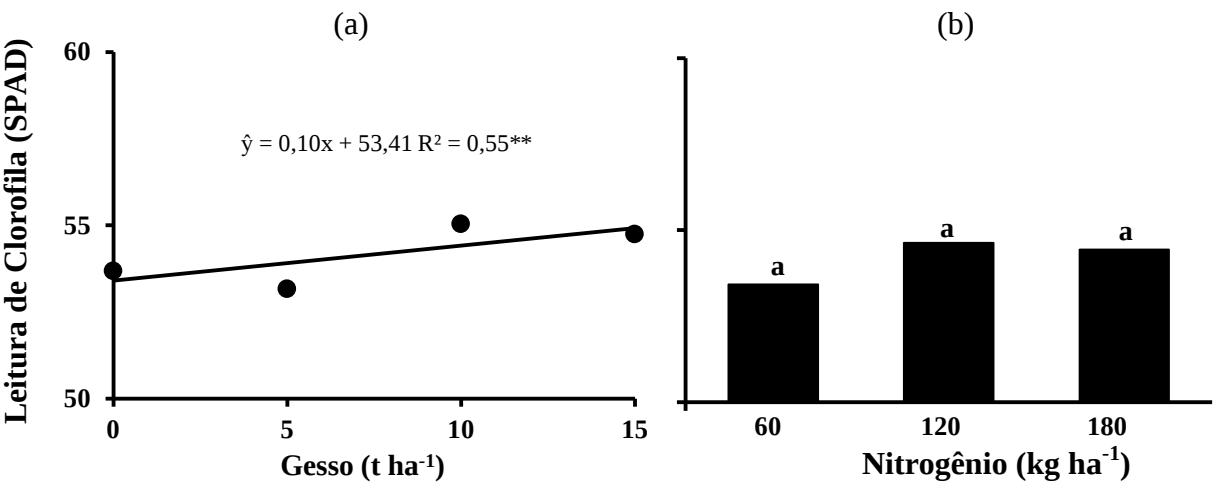


FIGURA 25. Alterações na leitura de clorofila nas folhas de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

A área da folha-índice do milho usada para a diagnose foliar foi influenciada pela interação entre as doses de gesso e de N em cobertura (Figura 26). Com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N, as doses de gesso promoveram aumento quadrático na área foliar do milho. Quando foram adicionados 120 kg ha⁻¹ de N, o aumento na área foliar do milho com as doses de gesso foi linear, e com a aplicação de 180 kg ha⁻¹ de N, não houve efeito do gesso na área foliar do milho.

As doses de N aplicadas em cobertura influenciaram a área foliar do milho nas parcelas sem gesso e com 15 t ha⁻¹ de gesso (Figura 26). Na ausência de gesso, a aplicação de 180 kg ha⁻¹ de N ocasionou maior área foliar do que as doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ de N e, quando foram aplicadas 15 t ha⁻¹ de gesso, as duas maiores doses de N (120 e 180 kg ha⁻¹) proporcionaram maior área foliar do que a menor dose de N (60 kg ha⁻¹). Amanullah et al. (2007) avaliaram a influência das mesmas doses de N empregadas no presente estudo sobre diversos parâmetros de área foliar do milho cultivado no Paquistão, e obtiveram diferenças estatísticas somente entre as doses de 60 e 180 kg ha⁻¹ de N aplicadas em cobertura.

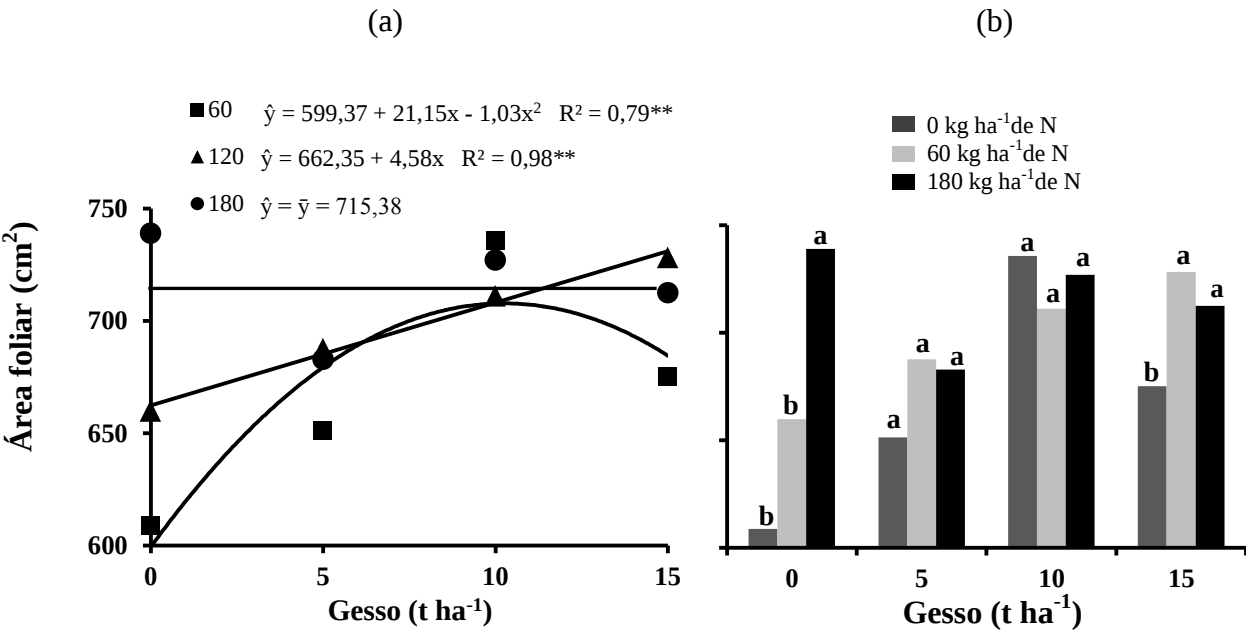


FIGURA 26. Alterações na área da folha-índice de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

4.1.3.2 Nutrientes nas Folhas

A análise de variância não revelou interação significativa para nenhum dos nutrientes determinados nas folhas de milho. Por essa razão, os efeitos das doses de gesso e de N em cobertura nos teores foliares de nutrientes foram analisados separadamente, pelas médias das observações (Tabela 6).

TABELA 6. Concentrações de nutrientes nas folhas de milho influenciadas pelas doses de gesso e de nitrogênio em cobertura.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn	Fe
	-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----			
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	34,84	3,55	32,3	5,95	1,41	1,68	14,42	31,86	12,43	108,33
5	34,72	4,34	32,5	5,66	1,30	2,36	15,24	39,26	13,27	121,66
10	36,49	3,67	33,1	5,88	0,97	3,11	13,09	39,69	11,68	99,77
15	35,65	3,96	35,6	5,75	1,14	4,46	14,87	46,92	13,34	112,55
Efeito	ns	Q*	L*	ns	L**	L**	ns	L*	ns	ns
CV (%)	4,48	10,9	8,36	5,52	21,3	16,04	18,45	21,51	23,71	18,43
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)										
60	33,32b	3,74	31,13	5,97	1,39a	3,14	13,73	34,51b	12,23	108,66
120	35,77ab	3,91	33,54	5,68	1,21ab	2,80	13,63	38,97ab	12,39	103,50
180	36,19a	4,01	34,23	5,79	1,02b	2,76	15,85	44,83a	13,42	119,58
Valor F	4,42*	1,42ns	2,95ns	2,34ns	6,11**	2,46ns	2,67ns	4,47*	0,55ns	0,55ns
CV (%)	4,48	10,9	8,36	5,52	21,3	16,04	18,45	21,51	23,71	18,43

L e Q: Efeito linear e quadrático por análise de regressão, ns: não significativo, *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$

As doses de gesso aplicadas na superfície aumentaram linearmente os teores de K, S e Mn, e de forma quadrática o teor de P nas folhas de milho (Tabela 6). A concentração de Mg no tecido foliar do milho foi reduzida linearmente com as doses de gesso aplicadas. A adubação de cobertura com 180 kg ha^{-1} de N proporcionou maiores concentrações de N e Mn, e teor mais baixo de Mg nas folhas de milho do que quando foi efetuada com 60 kg ha^{-1} de N. Caires et al. (2004) também observaram aumento de K e redução do Mg nas folhas de milho com a aplicação de gesso em sistema plantio direto. É possível que o aumento de K nas folhas com a adição de gesso esteja relacionado com a liberação de K^+ dos sítios de troca para a solução do solo, em consequência do aumento nos teores de Ca^{2+} trocável no solo (NOGUEIRA e MOZETO, 1990). O aumento de P e S, e a redução de Mg no tecido foliar com as doses de gesso, certamente foram reflexos do aumento de P (Figura 12) e de S-SO_4^{2-} (Figuras 14 e 15) no solo, e da movimentação de Mg^{2+} trocável das camadas superficiais para o subsolo (Figura 8), ocasionados pela adição de gesso. Destaca-se, entretanto, que o aumento de Mn nas folhas de milho ocorrido com as doses de gesso aplicadas não foi acompanhado por ganhos na disponibilidade de Mn no solo (Figura 19). Caires et al. (2003) verificaram que o gesso aumentou o teor de Mn nas folhas de soja e atribuíram esse efeito à formação de par iônico entre esse cátion e o sulfato, diminuindo a atividade desse elemento em solução, favorecendo, assim, o deslocamento do equilíbrio no solo, liberando mais íons Mn para a solução e permitindo maior absorção pelas plantas.

Aumento nas concentrações de P e S, e ausência de efeito no teor de N nas folhas de milho com a aplicação de gesso em plantio direto, também foram constatados por Caires et al. (2011). Em plantas de cevada, Caires et al. (2001) constataram aumento no teor foliar de P com a aplicação de gesso, sendo tal efeito atribuído à presença de P, como fração residual, no gesso agrícola. A não influência do gesso no teor de Ca nas folhas do milho difere dos resultados obtidos por Caires et al. (2004, 2011). Entretanto, Maschietto (2010) também não observou alteração na concentração de Ca nas folhas do milho em decorrência da aplicação de gesso, mesmo tendo ocorrido aumento de Ca^{2+} trocável ao longo do perfil do solo, como constatado no presente trabalho. Em outro trabalho, a ausência de efeito do gesso na concentração de Ca nas folhas de milho se deu em função dos elevados teores de Ca^{2+} trocável existentes no perfil do solo antes da instalação do experimento (MASCHIETTO, 2010), o que também pode ter acontecido no presente estudo (Tabela 1).

As maiores concentrações de N e Mn, e o teor mais baixo de Mg, no tecido foliar do milho, promovidos pela aplicação de 180 kg ha^{-1} de N, também estiveram relacionados com os ganhos na disponibilidade de N-NO_3^- (Figura 13) e de Mn (Figura 19) no solo, e com a movimentação Mg^{2+} trocável (Figura 8), decorrentes da aplicação de N na maior dose.

Feldhaus (2006) também observou aumento de Mn nas folhas de milho com a aplicação de N, na forma de nitrato de amônio, por causa da acidificação do solo ocasionada pela adubação nitrogenada.

A leitura de clorofila (SPAD) não se correlacionou com o teor de N nas folhas de milho. Esse resultado é contraditório com outros existentes na literatura que mostraram correlação positiva entre os teores de N nas folhas e as leituras de clorofila (ARGENTA et al., 2001; ZOTARELLI et al., 2003; SINGH et al., 2010). Entretanto, Schroder et al. (2000) ressaltam que as leituras pelo clorofilômetro apresentam baixa acuidade quando há grande oferta de N. Segundo os autores, quando há excesso de N disponível, nem todo nutriente é convertido em clorofila. Isso pode ter ocorrido no presente estudo, pois a aplicação de 180 kg ha⁻¹ de N em cobertura proporcionou maior teor de N nas folhas de milho (Tabela 6), mas não alterou significativamente a leitura de clorofila (Figura 25). Essa hipótese também justifica a divergência entre os resultados desse estudo com os de Liu e Wiatrak (2011), os quais obtiveram aumento na leitura de clorofila com as doses de N aplicadas no milho, porém, o teor de N no solo no experimento de Liu e Wiatrak (2011), realizado na Carolina do Sul (EUA), era muito menor que o teor de N no solo de Tibagi - PR, onde o presente estudo foi realizado. Cabe ressaltar que Liu e Wiatrak (2011) não obtiveram diferença significativa nas leituras de clorofila quando doses acima de 90 kg ha⁻¹ de N foram empregadas, reforçando a hipótese de Schroder et al.(2000), de que as leituras por meio do clorofilômetro perdem a acuidade quando a oferta de N é alta.

A concentração de N na folha-índice do milho (N-folha) foi corrigida de acordo com a área foliar (Af), por meio da equação: $NAf = [(Af \times N\text{-folha}) \times Af/739]$. A concentração de N na folha corrigida de acordo com a área foliar foi aumentada linearmente com as doses de gesso aplicadas (Figura 27). Esses resultados mostram que a aplicação de gesso não causou alteração significativa no teor foliar de N do milho (Tabela 6), provavelmente, por efeito de diluição do nutriente nos tecidos da folha, em decorrência de maior crescimento da planta. Assim, tanto a leitura de clorofila (Figura 25) como também a concentração de N na folha-índice corrigida pela área foliar foram aumentados com a aplicação de gesso. Isso significa que a adição de gesso melhorou a nutrição de N pelas plantas de milho. Correlação significativa entre a leitura de clorofila e a quantidade de N na área da folha também foi obtida por Peng et al.(1995) na cultura do arroz.

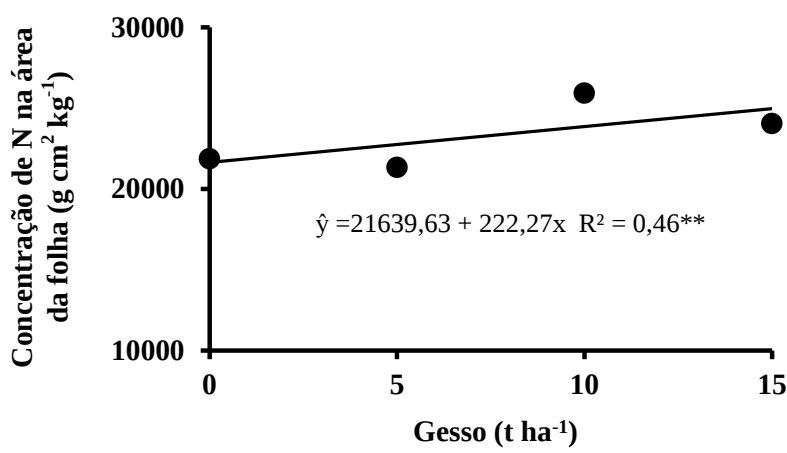


FIGURA 27. Concentração de N na área da folha-índice de milho, em função de doses de gesso aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$.

4.1.4 Produção de Matéria Seca e Extração de Nutrientes pela Cultura do Milho

A produção de matéria seca da parte aérea do milho não foi influenciada pela interação entre as doses de gesso e de N em cobertura. As doses de gesso aumentaram de forma quadrática a produção de matéria seca de milho (Figura 28a). De acordo com a equação de regressão ajustada, a máxima produção de matéria seca (8,91 t ha⁻¹) seria alcançada com a aplicação de 9,8 t ha⁻¹ de gesso. As doses de N aplicadas em cobertura não alteraram significativamente a produção de matéria seca da parte aérea do milho (Figura 28b).

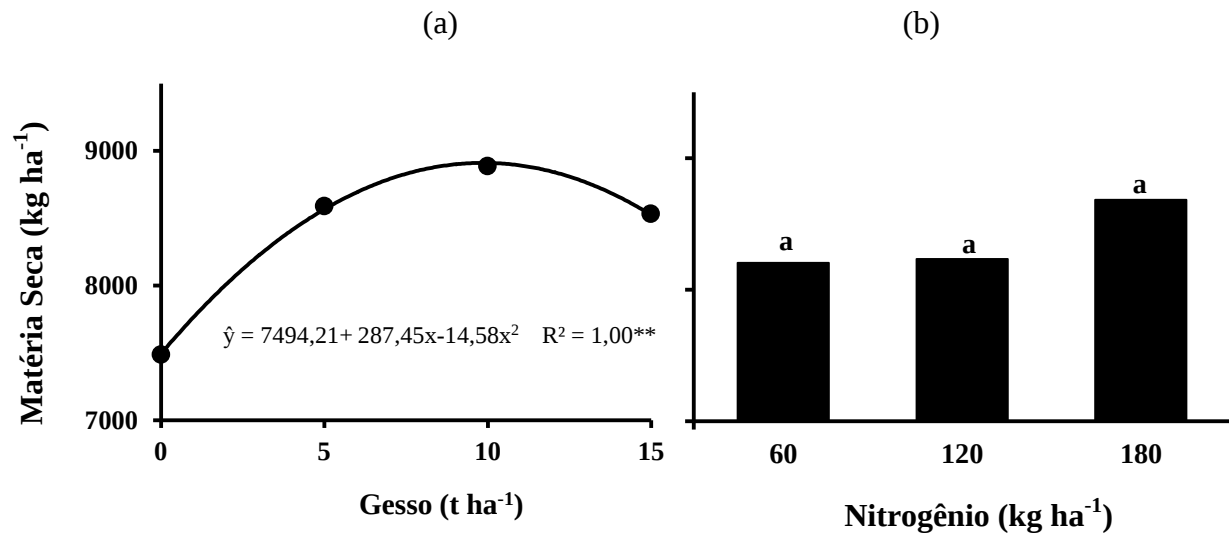


FIGURA 28. Produção de matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

O aumento da produção de matéria seca do milho esteve relacionado com a melhoria das condições de fertilidade no subsolo, ao correlacionar-se positivamente com a elevação do

Ca²⁺ de 0,2-0,6 m e com a redução da saturação por Al³⁺ de 0,4-0,6 m (Tabela 7). A redução do Mg²⁺ trocável nas camadas superficiais do solo (0,0-0,2 m) e o aumento na disponibilidade de S-SO₄²⁻ em profundidade (0,2-0,6 m) também beneficiaram a produção de matéria seca de parte aérea do milho, em resposta à aplicação de gesso.

TABELA 7. Coeficientes de correlação linear entre a produção de matéria seca da parte aérea do milho e os atributos químicos do solo, em função da profundidade.

Atributo	Matéria seca (kg ha ⁻¹)	
Ca ²⁺ trocável	Profundidade (m)	
	0,0-0,1	0,28ns
	0,1-0,2	0,17ns
	0,2-0,4	0,47**
	0,4-0,6	0,48**
Mg ²⁺ trocável		
	0,0-0,1	-0,75**
	0,1-0,2	-0,42**
	0,2-0,4	0,28ns
	0,4-0,6	0,31ns
Saturação por Al ³⁺		
	0,0-0,1	0,02ns
	0,1-0,2	0,04ns
	0,2-0,4	-0,30ns
	0,4-0,6	-0,72**
S-SO ₄ ²⁻ [Ca(H ₂ PO ₄) ₂]		
	0,0-0,1	0,18ns
	0,1-0,2	0,30ns
	0,2-0,4	0,48**
	0,4-0,6	0,48**
S-SO ₄ ²⁻ (NH ₄ OAc)		
	0,0-0,1	0,11ns
	0,1-0,2	0,31ns
	0,2-0,4	0,48**
	0,4-0,6	0,65**

ns: não-significativo e **: P < 0,01

A extração de N e P pelas plantas de milho foi influenciada pela interação entre as doses de gesso e de N em cobertura (Figura 29). Com a aplicação das duas maiores doses de N (120 e 180 kg ha⁻¹), ocorreram aumentos lineares na extração de N pelo milho com as doses de gesso; já, com a menor dose de N (60 kg ha⁻¹), a extração N pelo milho em função das doses de gesso teve comportamento quadrático. Essa diferença se deu pelo fato de que nas parcelas com 15 t ha⁻¹ de gesso, a dose de 60 kg ha⁻¹ de N mostrou-se estatisticamente inferior às demais doses de N, na quantidade de N extraída pelo milho. É interessante notar que nas parcelas sem gesso houve diferença na extração de N pelo milho entre a maior (180 kg ha⁻¹) e menor (60 kg ha⁻¹) dose de N. Esse efeito desapareceu com a aplicação de gesso nas doses de 5 e 10 t ha⁻¹, e voltou a aparecer na maior dose de gesso (15 t ha⁻¹). Destaca-se que, quando

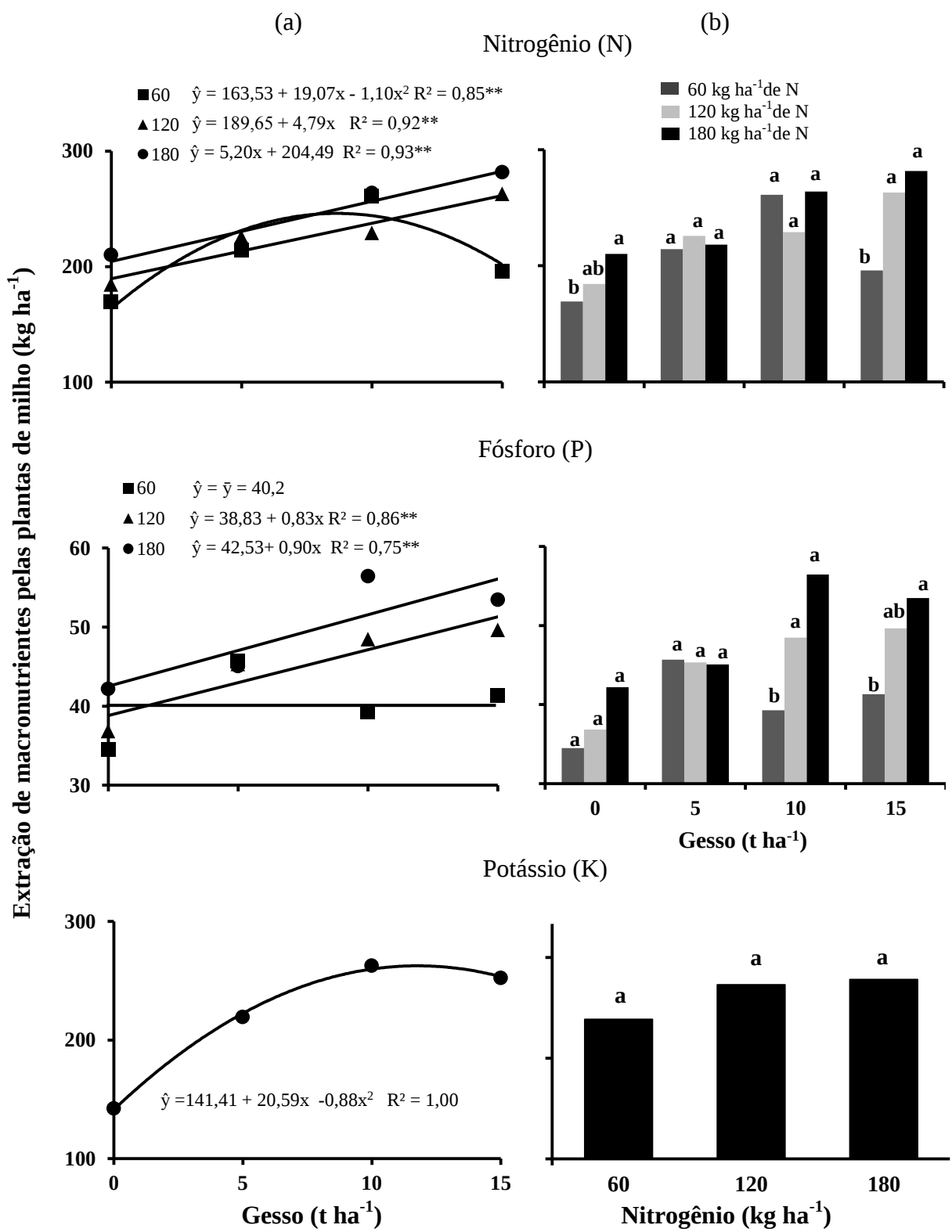


FIGURA 29. Extração de N, P e K pelas plantas de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

foram aplicadas 5 e 10 t ha⁻¹ de gesso, a extração de N pelo milho com 60 kg ha⁻¹ de N foi superior àquela quando se aplicou 180 kg ha⁻¹ de N na ausência de gesso.

A extração de N pelas plantas de milho correlacionou-se negativamente com a saturação por Al^{3+} no subsolo (0,4-0,6 m) ($P < 0,01$ e $r = -0,78$) e positivamente com o teor de S-SO_4^{2-} disponível no perfil do solo (0-60 m), extraído com as soluções de fosfato de cálcio ($P < 0,01$ e $r = 0,67$) e de acetato de amônio em ácido acético ($P < 0,01$ e $r = 0,62$). Isso significa que a redução na saturação por Al^{3+} no subsolo proporcionada pela aplicação de gesso beneficiou a absorção de NO_3^- em decorrência de maior aprofundamento das raízes (SOUSA e RITCHEY, 1986; van RAIJ, 2010) e que a maior disponibilidade de S no solo favoreceu a absorção de N pelas plantas (FAGERIA, 2005). Purcino et al. (2003) verificaram que a absorção de NO_3^- foi inibida em todos os genótipos de milho que tiveram menor crescimento radicular por causa da presença do Al. Em outros trabalhos realizados com plantas gramíneas também foi constatado que a absorção de N é fortemente influenciada pela disponibilidade de S no solo (CAMPOS, 2004; GYORÍ, 2005; KALMBACHER, 2005; BATISTA e MONTEIRO, 2006; SALVAGIOTTI et al., 2009).

A aplicação de gesso não alterou a extração de P pelo milho, quando a adubação nitrogenada foi realizada com 60 kg ha^{-1} de N (Figura 29). Quando foram aplicados 120 e 180 kg ha^{-1} de N, as doses de gesso aumentaram linearmente a extração de P pelas plantas. Essa diferença de comportamento ocorreu porque, quando foram aplicadas as doses mais elevadas de gesso (10 e 15 t ha^{-1}), a extração de P pelas plantas foi maior com a aplicação das maiores doses de N (120 e 180 kg ha^{-1}) em relação à dose de 60 kg ha^{-1} de N. A maior quantidade de N adicionada potencializou a extração de P pelas plantas em resposta à aplicação de gesso. O aumento na extração de P pelas plantas de milho acompanhou os ganhos na disponibilidade do nutriente no solo em decorrência da aplicação de gesso (Figura 12), sendo tal efeito ocasionado pela presença de P, como impureza, na composição do gesso agrícola.

A extração de K pelas plantas de milho de acordo com as doses de gesso empregadas foi aumentada conforme o modelo quadrático (Figura 29). De acordo com a equação de regressão ajustada, a maior extração de K pelas plantas seria obtida com a aplicação de $11,3 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso. Maior absorção de K pelas plantas em decorrência da aplicação de gesso também tem sido observada em outros trabalhos (CAIRES et al., 2001, 2004) e esse efeito deve estar relacionado com a liberação de K^+ dos sítios de troca para a solução do solo, em consequência do aumento nos teores de Ca^{2+} trocável no solo (NOGUEIRA e MOZETO, 1990). As doses de N aplicadas em cobertura não influenciaram a extração de K pelas plantas de milho.

A extração de S pelas plantas de milho foi aumentada linearmente com as doses de gesso aplicadas e não foi influenciada pelas doses de N em cobertura (Figura 30).

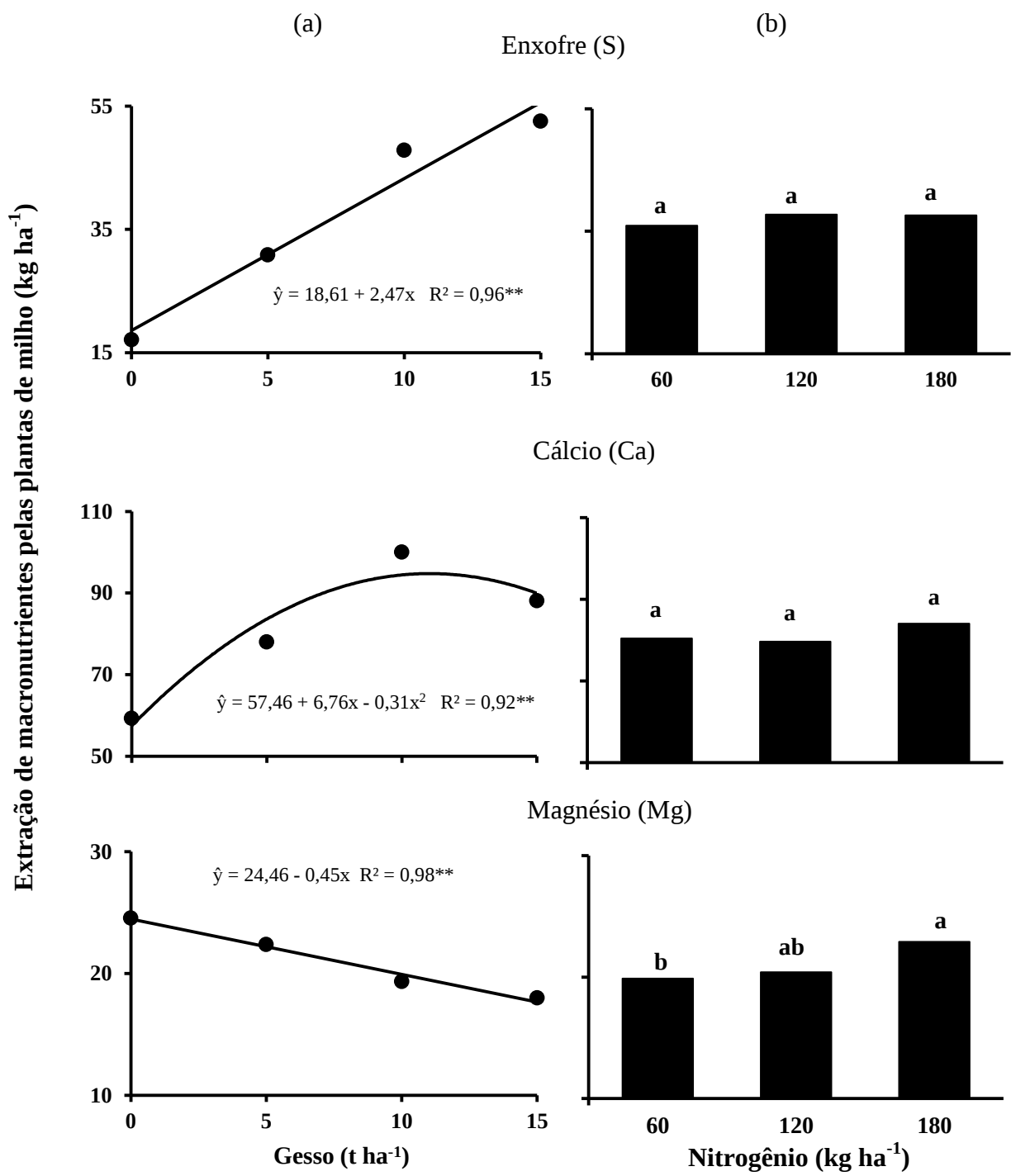


FIGURA 30. Extração de S, Ca e Mg pelas plantas de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

Comparando-se a extração de S pelas plantas nas parcelas sem gesso com a extração de S pelas plantas nas parcelas que receberam 15 t ha⁻¹ de gesso, observou-se que a extração de S pelo milho foi três vezes maior quando o gesso foi aplicado na maior dose (15 t ha⁻¹). A extração de S pelas plantas esteve estreitamente ($P < 0,01$) correlacionada com o teor de S-SO₄²⁻ no perfil do solo (0,0-0,6 m), extraído com as soluções de fosfato de cálcio ($r = 0,93$) e de acetato de amônio em ácido acético ($r = 0,94$).

A extração de Ca pelas plantas de milho foi aumentada com as doses de gesso aplicadas, conforme o modelo quadrático, e não foi alterada pelas doses de N em cobertura (Figura 30). De acordo com a equação de regressão ajustada, a máxima extração de Ca pelas plantas seria obtida com a aplicação de 10,9 t ha⁻¹ de gesso. A extração de Ca pelas plantas esteve significativamente ($P < 0,01$) correlacionada com teor de Ca²⁺ trocável ($r = 0,57$) no perfil do solo (0,0-0,6 m). Houve redução linear na extração de Mg pelas plantas de milho com as doses de gesso aplicadas, e aumento na extração do nutriente quando a maior dose de N (180 kg ha⁻¹) foi empregada em cobertura.

A extração de Cu, Zn, Mn e Fe pelas plantas de milho foram influenciadas pela aplicação de gesso e de N em cobertura (Figura 31). As doses de gesso proporcionaram aumento linear na extração de Cu, e quadrático na extração de Zn e Mn pelas plantas. Considerando a adubação nitrogenada (Figura 31), a maior dose de N (180 kg ha⁻¹) promoveu maior extração de Cu, Zn e Mn pelas plantas do que a menor dose de N (60 kg ha⁻¹). A extração de Fe pelas plantas foi influenciada pela interação entre as doses de gesso e de N em cobertura. Quando as maiores doses de N foram empregadas (120 e 180 kg ha⁻¹), as doses de gesso aumentaram a extração de Fe pelas plantas, conforme o modelo quadrático. Com a aplicação da menor dose de N (60 kg ha⁻¹), as doses de gesso não alteraram a extração de Fe pelas plantas de milho. A interação ocorreu porque a aplicação da maior dose de N (180 kg ha⁻¹) resultou em maior extração de Fe do que o emprego da menor dose de N (60 kg ha⁻¹), somente nas parcelas que receberam as maiores doses de gesso (10 e 15 t ha⁻¹ de gesso).

O aumento da densidade de comprimento de raízes e do comprimento radicular do milho até a profundidade de 0,6 m, ocasionado pela adição de gesso, esteve correlacionado com a extração de quase todos os nutrientes (Tabela 8). Isso demonstra que o maior crescimento e aprofundamento do sistema radicular do milho favoreceram a absorção de nutrientes pelas plantas. O Ca e o S foram os nutrientes que apresentaram os maiores coeficientes de correlação entre a absorção e o crescimento radicular do milho. A extração de Mg pelas plantas teve correlação negativa com o crescimento das raízes de milho porque o aumento no crescimento das raízes, devido ao gesso, foi acompanhado por redução na extração de Mg pelas plantas causada pela diminuição do Mg²⁺ trocável nas camadas superficiais do solo por sua movimentação com o sulfato. Ressalta-se que a perda de Mg²⁺, por si só, não acarreta redução no crescimento das raízes (DA SILVA et al., 2008, 2009).

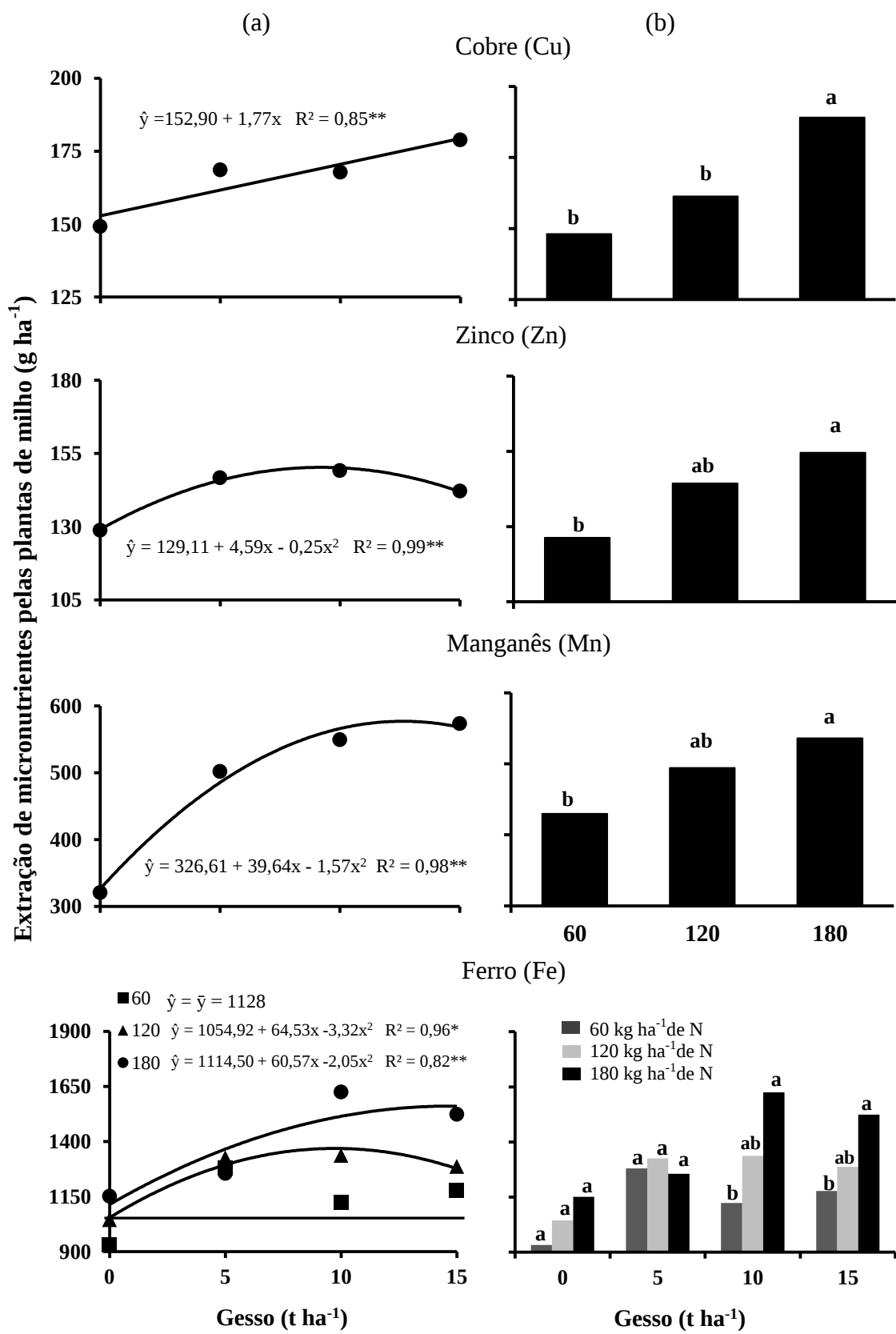


FIGURA 31. Extração de Cu, Zn, Mn e Fe pelas plantas de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicados na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

TABELA 8. Coeficientes de correlação linear entre a extração de nutrientes pelas plantas e o crescimento radicular do milho, em função da profundidade.

Extração de nutrientes (kg ha ⁻¹)	Densidade de comprimento de raízes (cm cm ³)				Comprimento radicular (m)
	Profundidade do solo (m)				
	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	
N	0,10ns	0,50**	0,43**	0,13ns	0,60**
P	0,13ns	0,52**	0,45**	0,16ns	0,62**
K	0,32*	0,60**	0,58**	0,35**	0,71**
Ca	0,79**	0,75**	0,63**	0,61**	0,89**
Mg	-0,42**	-0,32**	-0,51**	-0,68**	-0,43**
S	0,54**	0,69**	0,65**	0,58**	0,84**
Cu	0,02ns	0,40**	0,28ns	0,08ns	0,38*
Fe	0,01ns	0,10ns	0,23ns	0,04ns	0,18ns
Zn	0,00ns	0,41**	0,40**	0,11ns	0,37*
Mn	0,17ns	0,60**	0,44**	0,49*	0,57**

ns: não significativo, *: significativo a P<0.05 e **: P<0.01

4.1.5 Concentração e Exportação de Nutrientes pelos Grãos de Milho

As doses de gesso aumentaram de forma quadrática o teor de Ca, e linear os teores de S e Mn nos grãos de milho (Tabela 9). O teor de Mg nos grãos foi reduzido linearmente com as doses de gesso aplicadas. Quanto à adubação nitrogenada de cobertura, maiores teores de N, Mn e Fe nos grãos foram encontrados com a aplicação de 180 kg ha⁻¹ de N em relação à dose de 60 kg ha⁻¹ de N. Os teores de P nos grãos de milho foram mais altos com a aplicação de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N do que com 60 kg ha⁻¹ de N (Tabela 9). De acordo com Hanway e Weber 1971 apud Sinclair e Vadez (2002), a concentração de P nos grãos pode variar em função do suprimento de N para as plantas. Schulthess, Feil e Jutzi (1997) demonstraram forte influência da aplicação de N no aumento de P nos grãos de trigo.

TABELA 9. Concentrações de nutrientes nos grãos de milho influenciadas pelas doses de gesso e de nitrogênio em cobertura.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn	Fe
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	14,30	3,61	2,92	4,70	1,70	1,51	16,02	35,46	13,75	114,43
5	14,24	3,68	3,42	5,21	1,54	2,15	15,40	45,67	14,02	116,76
10	14,46	3,57	3,26	5,90	1,22	3,16	14,82	46,69	12,98	120,76
15	13,94	3,65	3,24	4,85	1,12	3,59	14,33	49,03	11,74	111,65
Efeito	ns	ns	ns	Q**	L**	L**	ns	L**	ns	ns
CV (%)	3,36	6,37	16,48	10,52	13,82	9,16	15,85	9,98	16,35	9,22
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)										
60	13,93b	3,41b	3,17	5,97	1,39	3,14	14,36	40,91b	12,23	111,00b
120	13,88b	3,65a	3,26	5,68	1,21	2,80	14,61	44,67ab	12,39	112,50b
180	14,60a	3,83a	3,37	5,79	1,02	2,76	16,35	46,80a	13,42	126,58a
Valor F	8,73**	9,9**	0,15ns	1,44ns	1,21ns	0,65ns	2,73ns	5,34*	1,95ns	7,85*
CV (%)	3,36	6,37	16,48	10,52	13,82	9,16	15,85	9,98	16,35	9,22

L e Q: Efeito linear e quadrático por análise de regressão; ns: não-significativo, *: P < 0,05 e **: P < 0,01

O aumento de Ca nos grãos de milho em resposta à aplicação de gesso (Tabela 9) deve ter sido ocasionado pelo aumento de Ca^{2+} trocável no solo. Destaca-se que a aplicação de gesso não ocasionou alterações significativas no teor de Ca nas folhas de milho (Tabela 6), o que sugere que a análise efetuada nos grãos foi mais sensível do que nas folhas para detectar alterações na nutrição de Ca na planta decorrentes da adição de gesso. Os aumentos nos teores de S e Mn, bem como a redução no teor de Mg, observados nos grãos com a aplicação de gesso (Tabela 9), também foram encontrados nas folhas de milho (Tabela 6). O aumento na disponibilidade de S-SO_4^{2-} no perfil do solo (0,0-0,6 m) proporcionado pela aplicação de gesso beneficiou a absorção de S pelas plantas (Figura 30) e o teor de S nos grãos (Tabela 9), mostrando que o milho foi capaz de redistribuir o S absorvido do gesso adicionado. Silva et al. (2003) estudaram a absorção e a redistribuição de S pelo milho, por meio de isótopo radioativo de S, e constataram que a maior fração do S absorvido pelas plantas encontrava-se na raiz (média de 82%), e o restante na parte aérea. Considerando essa dificuldade das plantas de milho na redistribuição do S absorvido, o aumento na concentração de sulfato no solo por meio da aplicação de doses elevadas de gesso pode ser importante para melhorar a eficiência das plantas na redistribuição do nutriente, tendo em vista que a adição de 15 t ha^{-1} de gesso aumentou em quase 2,5 vezes a concentração de S nos grãos de milho (Tabela 9). Como a maior concentração de Mn nos grãos proporcionada pela adição de gesso não esteve relacionada com as alterações do nutriente no solo, é possível que a formação de par iônico entre o Mn e o sulfato na solução tenha diminuído a atividade do Mn, favorecendo, assim, o deslocamento do equilíbrio no solo, liberando mais íons Mn para a solução e permitindo maior absorção pelas plantas (Caires et al., 2003). A redução no teor de Mg nos grãos de milho com a aplicação de gesso (Tabela 9), a exemplo do que também ocorreu nas folhas (Tabela 6), deve ter sido ocasionada pela movimentação de Mg^{2+} trocável das camadas superficiais para o subsolo.

Fageria (2005) destaca o efeito positivo da interação do N com todos os demais nutrientes para a nutrição das plantas. Embora os mecanismos envolvidos em tais interações ainda não estejam totalmente esclarecidos, a hipótese mais bem aceita é a de que o N, ao favorecer o crescimento radicular, aumenta a absorção dos nutrientes. Além disso, a adubação nitrogenada, ao acidificar o solo, aumenta os teores disponíveis de micronutrientes catiônicos. Feldhaus (2006) obteve maior absorção de Mn pelo milho com a aplicação de 180 kg ha^{-1} de N, na forma de nitrato de amônio, e atribuiu a maior quantidade de Mn extraída pelas plantas à acidificação do solo gerada pelo fertilizante nitrogenado. Destaca-se, no presente estudo, que a aplicação da maior dose de N (180 kg ha^{-1}) proporcionou maior concentração de Mn, tanto nas folhas (Tabela 6) como nos grãos (Tabela 9), e que o mesmo não ocorreu com o teor

de Fe, o qual foi mais alto apenas nos grãos de milho com o emprego da dose mais elevada de N na adubação de cobertura.

A exportação de N e K pelos grãos de milho foi aumentada com as doses de gesso, conforme o modelo quadrático (Figura 32). A aplicação de 180 kg ha⁻¹ N aumentou a exportação de N pelos grãos em comparação com a dose de 60 kg ha⁻¹ de N, e a exportação de K pelos grãos não foi influenciada pelas doses de N em cobertura. Para as quantidades de P exportadas pelos grãos, a análise de variância revelou interação significativa entre as doses de gesso e de N. Quando o N foi aplicado na menor dose (60 kg ha⁻¹), a exportação de P pelos grãos não foi afetada pelas doses de gesso; entretanto, quando a adubação nitrogenada foi realizada com 120 e 180 kg ha⁻¹ de N, as doses de gesso ocasionaram aumento linear na exportação de P pelos grãos. Isso ocorreu porque, nas parcelas com as maiores doses de gesso (10 e 15 t ha⁻¹), as maiores doses de N (120 e 180 kg ha⁻¹) ocasionaram maior exportação de P do que a dose de 60 kg ha⁻¹ de N. Segundo Cantarella (2007), a interação N × P no milho é bastante conhecida, sendo o aumento na absorção de P pelas plantas quando o N é empregado, principalmente, na forma amoniacal, o efeito mais frequentemente reportado na literatura, conforme também observado no presente estudo.

As doses de gesso promoveram aumento linear na exportação de S, e quadrático na exportação de Ca, pelos grãos de milho (Figura 33). Destaca-se que a aplicação da maior dose de gesso (15 t ha⁻¹) resultou em exportação de S pelos grãos de milho 3 vezes maior, quando comparada ao tratamento sem gesso. As quantidades de Mg exportadas pelos grãos foram linearmente reduzidas com as doses de gesso aplicadas. De forma semelhante à observada para a extração de S, Ca e Mg pela parte aérea das plantas de milho (Figura 30), a exportação de S e Ca não foi influenciada pelas doses de N empregadas em cobertura, e aplicação de 180 kg ha⁻¹ proporcionou maior exportação Mg pelos grãos quando comparada com a dose de 60 kg ha⁻¹ de N.

As quantidades de Cu, Zn e Mn exportadas pelos grãos de milho foram aumentadas tanto pelas doses de gesso como pelas doses de N em cobertura (Figura 34). A exportação do Fe pelos grãos foi influenciada pela interação entre as doses de gesso e de N em cobertura. As doses de gesso elevaram de maneira linear a exportação de Cu, e de forma quadrática a de Zn e Mn pelos grãos. Quanto à adubação nitrogenada, a aplicação de 180 kg ha⁻¹ de N acarretou em maior exportação de Cu e Zn quando comparada com a dose de 60 kg ha⁻¹ de N, enquanto as doses de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N ocasionaram maior exportação de Mn do que a dose de 60 kg ha⁻¹ de N. A exportação de Fe pelos grãos (Figura 34) teve comportamento semelhante ao obtido para a extração de Fe pela parte aérea das plantas (Figura 31), de forma que não houve efeito das doses de gesso na exportação de Fe com o emprego de 60 kg ha⁻¹ de N, mas com

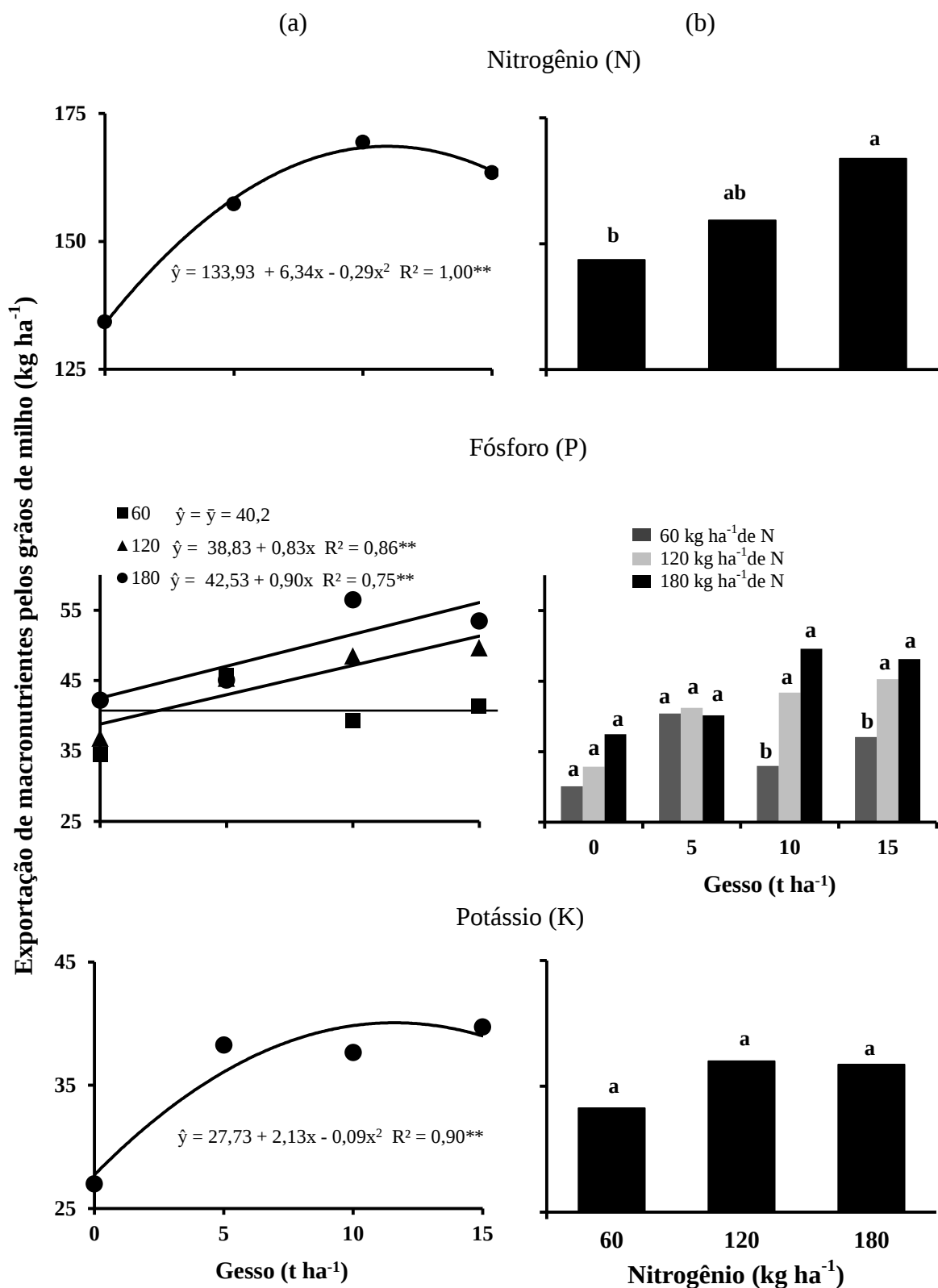


FIGURA 32. Exportação de N, P e K pelos grãos de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

120 e 180 kg ha⁻¹ de N, ocorreu aumento na exportação de Fe pelos grãos, conforme os modelos quadrático e linear, respectivamente. Como também observado para a extração de Fe pela parte aérea das plantas, a interação ocorreu em função da mais alta exportação de Fe

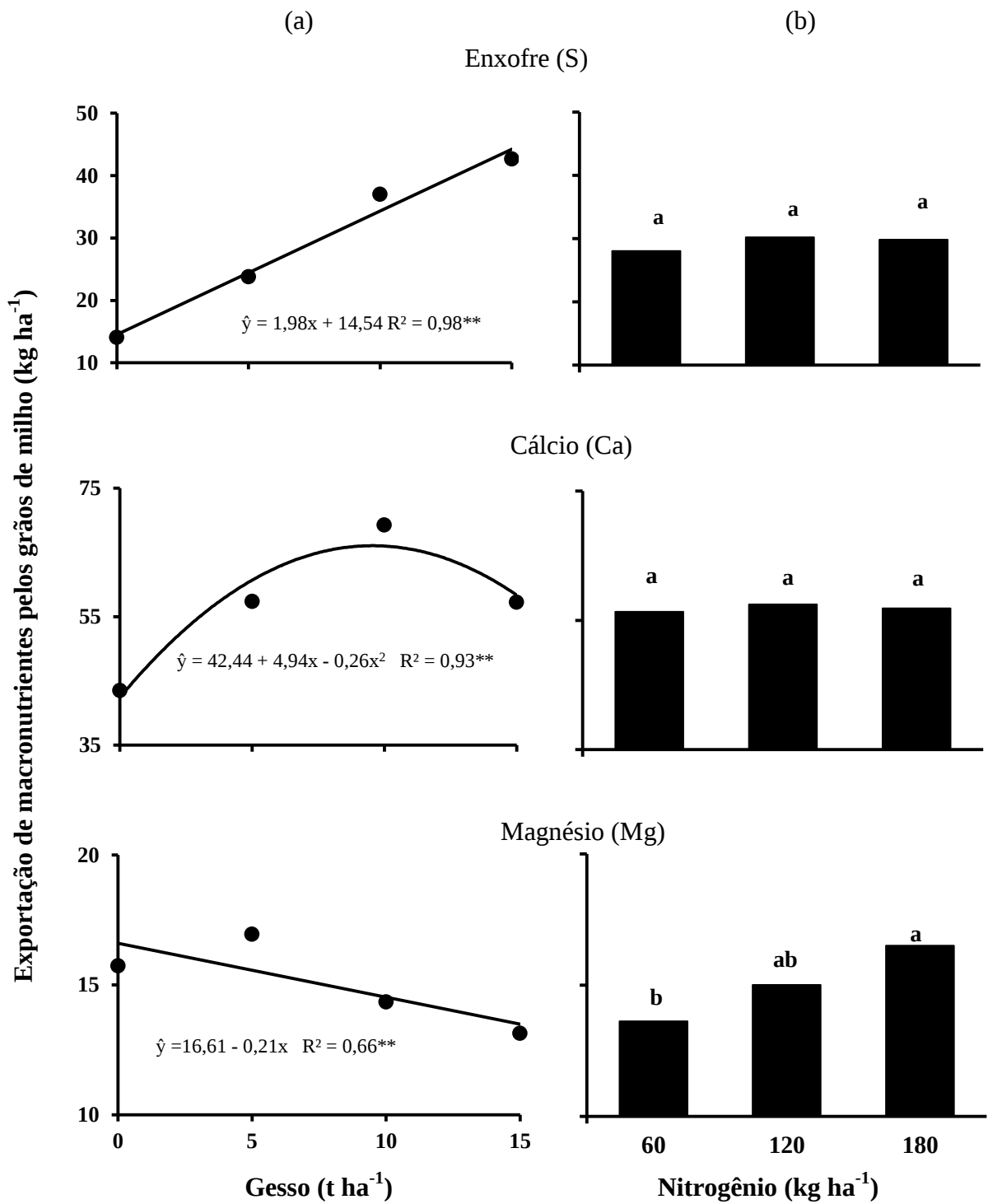


FIGURA 33. Exportação de S, Ca, Mg pelos grãos de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

obtida com o emprego da maior dose de N (180 kg ha^{-1}) nas parcelas que receberam as doses mais elevadas de gesso (10 e 15 t ha^{-1}).

É importante destacar que, de modo geral, a aplicação de gesso aumentou as quantidades de N, P, K, Ca, S, Cu, Zn, Mn e Fe extraídas pela parte aérea das plantas e exportadas pelos grãos de milho. O Mg foi o único nutriente que teve menor extração pelas

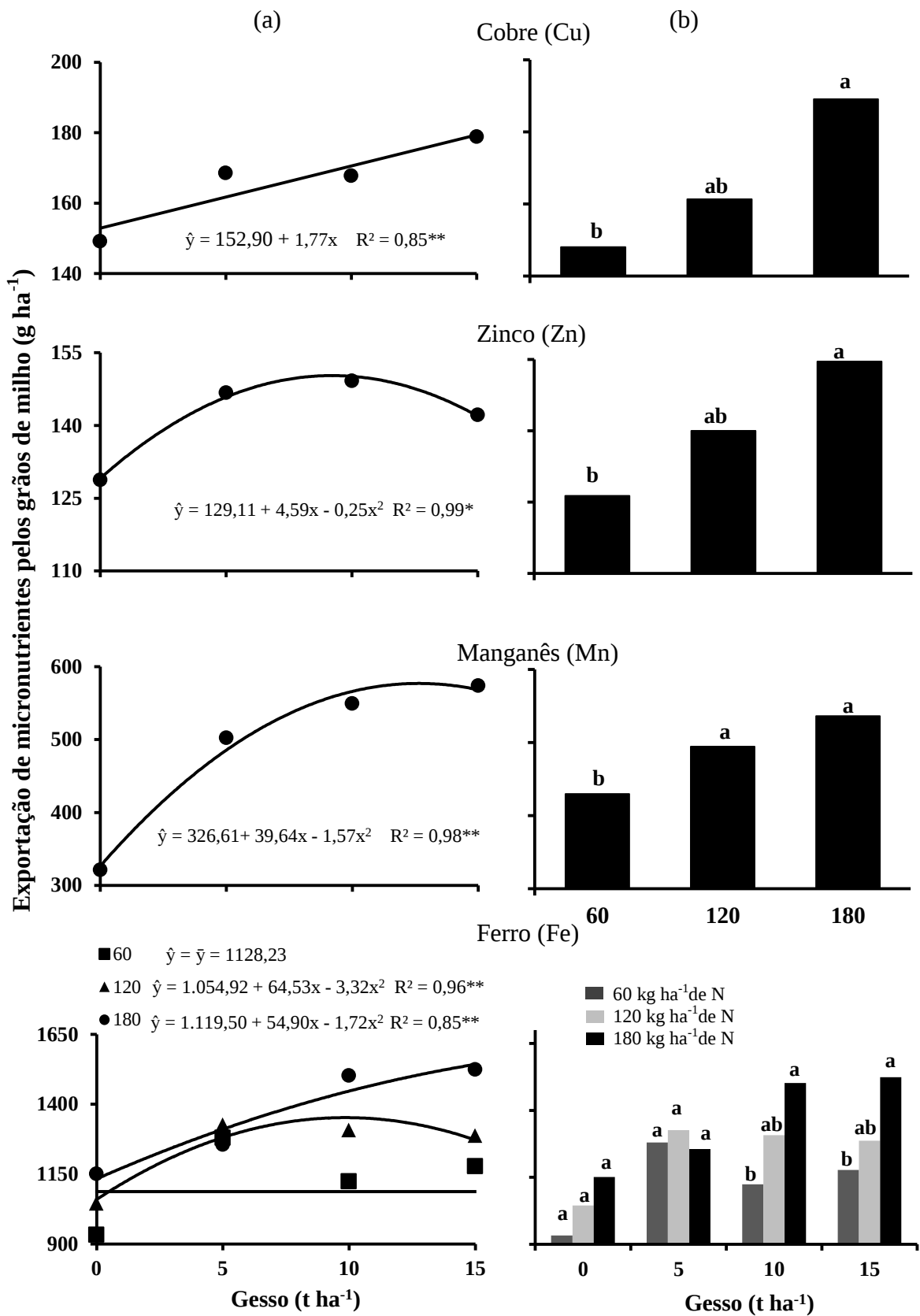


FIGURA 34. Exportação de Cu, Zn, Mn e Fe pelos grãos de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicados na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

plantas e mais baixa exportação pelos grãos com o adição de gesso. Por outro lado, o emprego de N em cobertura na maior dose (180 kg ha⁻¹) aumentou a extração e a exportação de N, P, Mg, Cu, Zn, Mn e Fe pela cultura do milho.

4.1.6 Produtividade de grãos de milho

A produtividade de grãos de milho não foi influenciada pela interação entre as doses de gesso e de N em cobertura (Figura 35), mas tanto a aplicação de gesso como a adubação nitrogenada de cobertura proporcionaram incrementos importantes no rendimento de grãos de milho. As doses de gesso aumentaram a produtividade de grãos de milho, conforme o modelo quadrático, e a cobertura nitrogenada com a maior dose de N (180 kg ha⁻¹) proporcionou produtividade de grãos de milho significativamente mais alta do que a obtida com a menor dose de N aplicada (60 kg ha⁻¹). De acordo com a equação de regressão ajustada, a máxima produtividade de grãos de milho (11.730 kg ha⁻¹) seria obtida com a aplicação de 12,2 t ha⁻¹ de gesso, proporcionando um acréscimo na produtividade da ordem de 2.450 kg ha⁻¹ de grãos (26%). Esse incremento na produtividade de grãos foi bem mais acentuado do que o obtido com o aumento da dose de N em cobertura, de 60 para 180 kg ha⁻¹, o qual elevou a produtividade em 1.227 kg ha⁻¹ de grãos (12%).

Os incrementos obtidos na produtividade de grãos de milho em resposta à aplicação superficial de gesso foram ainda mais expressivos do que os encontrados em outros estudos realizados em sistema plantio direto (CAIRES et al. 1999, 2004, 2011; CAIRES, JORIS e CHURKA, 2011). Caires et al. (1999, 2011) também encontraram resposta quadrática na produtividade de grãos de milho cultivado em plantio direto, com o emprego de doses de gesso de até 12 t ha⁻¹. Nesses estudos, as máximas produtividades de grãos foram alcançadas,

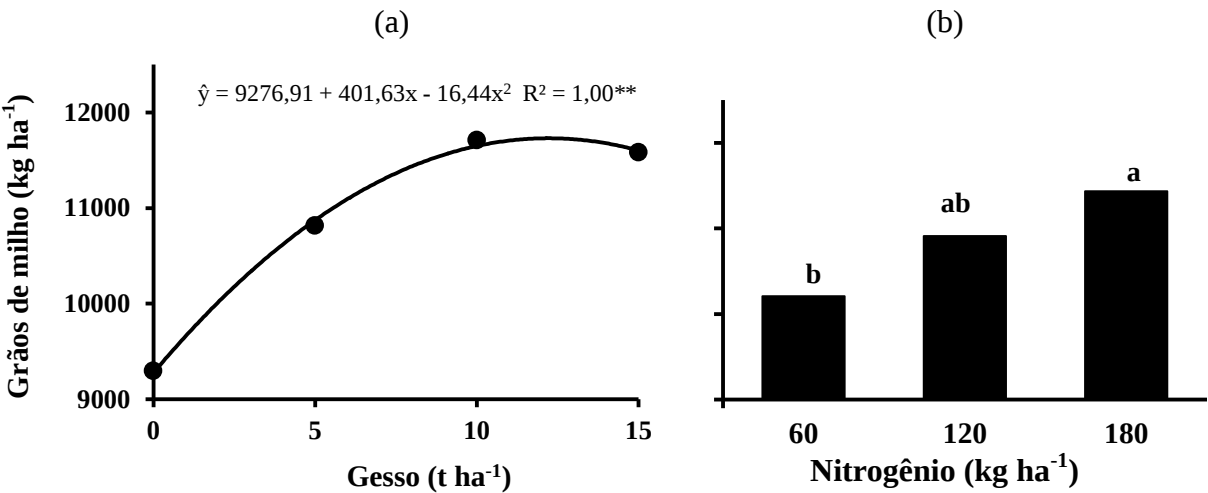


FIGURA 35. Produtividade de grãos de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície **: P < 0,01. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

respectivamente, com a aplicação de 9,5 e 7,8 t ha⁻¹ de gesso. Comparando-se esses resultados com os obtidos no presente estudo, pode-se inferir que as maiores produtividades de grãos milho de milho com a aplicação de gesso em sistema plantio direto têm sido obtidas com o emprego de doses relativamente altas de gesso agrícola.

Aumentos na produtividade de grãos de milho como resultado da aplicação de N em cobertura têm sido relatados com frequência na literatura (MA et al., 1999; FERNANDES et al., 2005; GOMES et al., 2007; SANGOI, ERNANI e da SILVA, 2007; RAMBO et al., 2007; LIU e WIATRAK, 2011). A ausência de diferença na produtividade de grãos de milho com a aplicação de 120 ou 180 kg ha⁻¹ de N está de acordo com os resultados obtidos em outros estudos realizados em diferentes condições de solo e clima (SCHMITD et al., 2002; FERNANDES et al., 2005; LIU e WIATRAK, 2011). No estudo de Schmitd et al. (2002), realizado em quatro locais do estado de Nebraska (EUA), com doses de N variando de 0 a 400 kg ha⁻¹, verificou-se que o incremento na produtividade de grãos de milho deixou de ocorrer a partir da aplicação de 130 kg ha⁻¹ de N. Fernandes et al. (2005) e Liu e Wiatrak (2011) aplicaram cinco doses de N, de 0 a 180 kg ha⁻¹, na cultura do milho em sistema plantio direto, e observaram que a partir de 90 kg ha⁻¹ de N a produtividade de grãos de milho não foi mais influenciada pelas doses de N aplicadas.

Dos componentes de rendimento de milho avaliados (comprimento e diâmetro da espiga, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e massa de 1000 grãos), somente o número de grãos por espiga e a massa de 1000 grãos foram influenciados pelas doses de gesso e N em cobertura (Figura 36). Isso porque o comprimento e o diâmetro da espiga, o número de fileiras por espiga e o número de grãos por fileira são características menos dependentes do ambiente, vinculadas à herdabilidade dos híbridos de milho. Para o número de grãos por espiga observou-se interação significativa entre as doses de gesso e de N (Figura 36), de forma que não houve resposta do gesso quando o N foi aplicado na dose de 60 kg ha⁻¹; já, com a aplicação de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N, o número de grãos por espiga foi aumentado de forma quadrática e linear, respectivamente, em função das doses de gesso. Cabe ressaltar que ocorreu uma queda significativa no número de grãos por espiga nas parcelas que receberam a maior dose de gesso (15 t ha⁻¹), quando as duas menores doses de N (60 e 120 kg ha⁻¹) foram aplicadas. É possível que esse efeito esteja relacionado com a mais baixa extração de Mg pelas plantas que foi ocasionada pela maior dose de gesso (Figura 30), tendo em vista que a aplicação de N na maior dose (180 kg ha⁻¹) amenizou esse efeito por ter aumentado a extração de Mg pelas plantas. A massa de 1000 grãos de milho foi aumentada com as doses de gesso aplicadas, conforme o modelo quadrático, e também foi maior com a aplicação de N na dose de 180 kg ha⁻¹ em relação à de 60 kg ha⁻¹ (Figura 36).

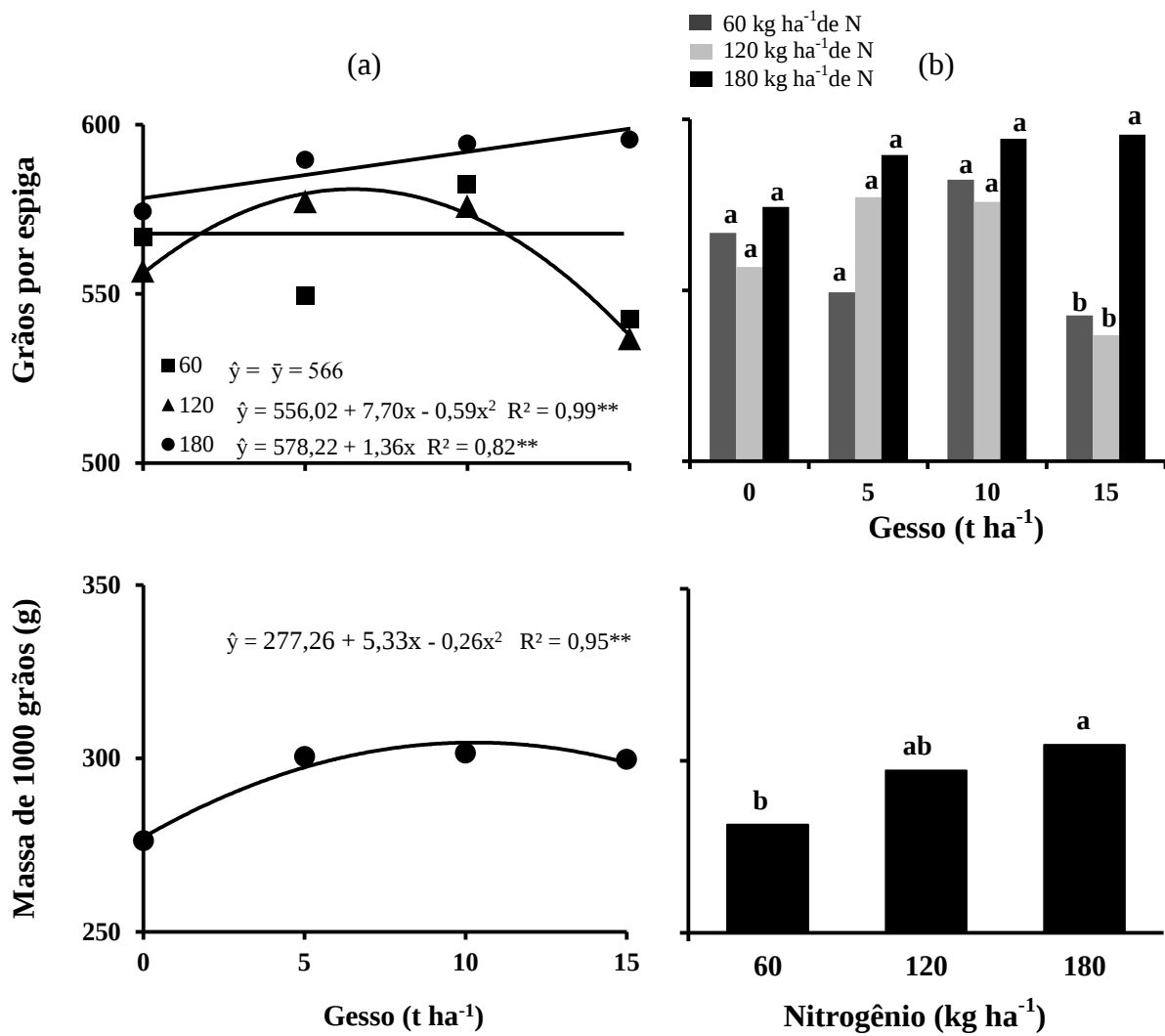


FIGURA 36. Número de grãos por espiga e massa de 1000 grãos de milho, em função de doses de gesso (a) e de nitrogênio (b) aplicadas na superfície. **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

Considerando a estreita correlação ($P < 0,01$) obtida entre a produtividade de grãos e a massa de 1000 grãos de milho ($r = 0,88$), os incrementos ocorridos na produtividade de milho com as aplicações de gesso e de N em cobertura (Figura 35) devem ter sido ocasionados, de forma mais expressiva, pelo aumento na massa dos grãos.

4.1.7 Eficiência do Gesso na Utilização do Nitrogênio

Análise de variância revelou interação significativa entre as doses de gesso e de N em cobertura para todas as eficiências calculadas: eficiência agrônômica (EA), eficiência fisiológica (EF), eficiência agrofisiológica (EAF), eficiência na recuperação aparente (ERA), fator parcial de produtividade do N (FPP_N) e eficiência de uso do N (EUN).

Para a EA, que leva em consideração o incremento na produtividade de grãos em relação à dose de N aplicada (Figura 37), observou-se que para as doses de 60 e 180 kg ha⁻¹ de

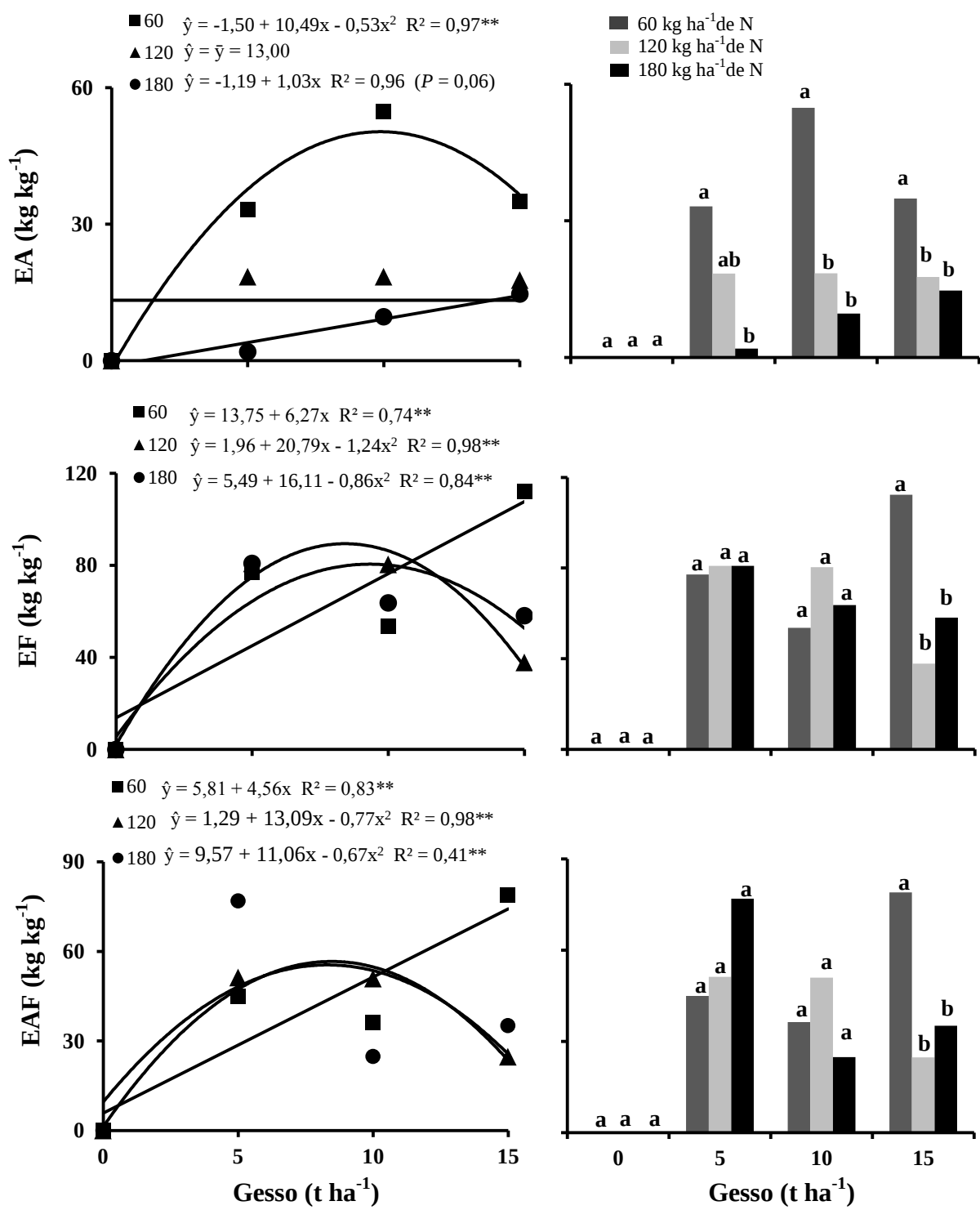


FIGURA 37. Eficiência agrônômica (EA), eficiência fisiológica (EF) e eficiência agrofisiológica (EAF), considerando as doses de gesso e de nitrogênio aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

N, as doses de gesso aumentaram a EA de forma quadrática e linear respectivamente, sendo que a EA não foi influenciada pela aplicação de gesso com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N. Quando a menor dose de N foi empregada (60 kg ha⁻¹), a máxima EA, de 52 kg kg⁻¹, foi obtida com a aplicação de 10 t ha⁻¹ de gesso. Já, na resposta linear constatada com o uso de

180 kg ha⁻¹ de N, a máxima EA com a aplicação de 15 t ha⁻¹ de gesso foi de 14 kg kg⁻¹, a qual foi muito semelhante à EA obtida com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N (13 kg kg⁻¹), independentemente da aplicação de gesso. Para todas as doses de gesso aplicadas, a maior EA foi obtida com a aplicação da menor dose de N (60 kg ha⁻¹).

A EF, que considera a produtividade total da planta (grãos e palha) em relação à quantidade de N acumulada na planta (Figura 37), foi aumentada linearmente pelas doses de gesso quando o N foi aplicado na dose de 60 kg ha⁻¹, e de forma quadrática quando as duas maiores doses de N foram empregadas (120 e 180 kg ha⁻¹). Com a aplicação da menor dose de N (60 kg ha⁻¹), a máxima EF, obtida com a maior dose de gesso (15 t ha⁻¹), foi de 108 kg kg⁻¹. Com 120 kg ha⁻¹ de N, a máxima EF, de 87 kg kg⁻¹, seria obtida com a dose de 8,4 t ha⁻¹ de gesso e, com 180 kg ha⁻¹ de N, a maior EF, de 75 kg kg⁻¹, seria obtida com a dose de 9,4 t ha⁻¹ de gesso. Quando o gesso foi aplicado na maior dose (15 t ha⁻¹), a EF obtida com a menor dose de N aplicada (60 kg ha⁻¹) foi significativamente maior do que aquelas encontradas com as maiores doses de N (120 e 180 kg ha⁻¹).

O comportamento da EAF, que leva em consideração o incremento na produtividade de grãos em relação à quantidade de N acumulada na planta, foi muito semelhante ao da EF (Figura 37). As doses de gesso aumentaram linearmente a EAF quando o N foi aplicado na dose de 60 kg ha⁻¹, e de forma quadrática quando as duas maiores doses de N foram empregadas (120 e 180 kg ha⁻¹). Com a aplicação da menor dose de N (60 kg ha⁻¹), a máxima EAF, obtida com a maior dose de gesso (15 t ha⁻¹), foi de 74 kg kg⁻¹. Com 120 kg ha⁻¹ de N, a máxima EAF, de 56 kg kg⁻¹, seria obtida com a dose de 8,5 t ha⁻¹ de gesso e, com 180 kg ha⁻¹ de N, a maior EAF, de 46 kg kg⁻¹, seria obtida com a dose de 8,3 t ha⁻¹ de gesso. Quando o gesso foi aplicado na maior dose (15 t ha⁻¹), a EAF obtida com a menor dose de N aplicada (60 kg ha⁻¹) foi significativamente maior do que aquelas encontradas com as maiores doses de N (120 e 180 kg ha⁻¹).

A ERA, que considera em termos percentuais a quantidade de N acumulada na planta em relação à quantidade de N aplicada, foi aumentada com as doses de gesso aplicadas, de forma quadrática, quando a dose de N foi de 60 kg ha⁻¹, e linear, quando a dose foi de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N (Figura 38). Com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N, a máxima ERA, de 128%, seria obtida com a dose de 8,6 t ha⁻¹ de gesso e, com a aplicação de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N, a máxima ERA, obtida com 15 t ha⁻¹ de gesso, seria respectivamente de 64% e 40%. Quando o gesso foi aplicado nas doses de 5 e 10 t ha⁻¹, a ERA com 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura foi significativamente maior do que as obtidas com as doses de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N.

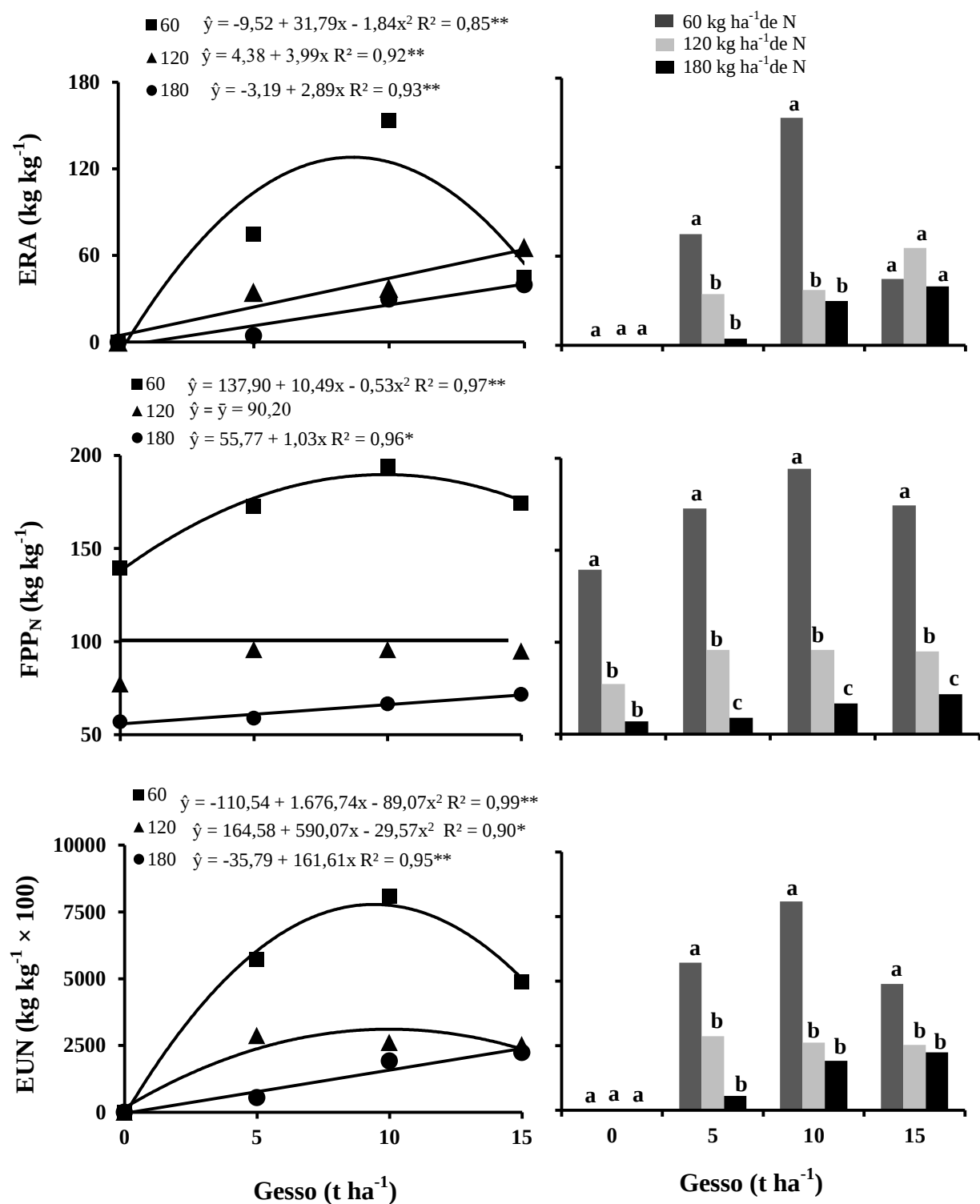


FIGURA 38. Eficiência na recuperação aparente (ERA), fator parcial de produtividade do N (FPP_N) e eficiência de uso do N (EUN), considerando as doses de gesso e de nitrogênio aplicadas na superfície. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

O FPP_N, que leva em consideração somente a produtividade de grãos em relação à quantidade de N aplicada (Figura 38), teve comportamento semelhante à EA (Figura 37) para as doses de gesso. O FPP_N foi aumentado de forma quadrática em função das doses de gesso

quando o N foi aplicado na dose de 60 kg ha^{-1} , não foi influenciado pela aplicação de gesso na dose de 120 kg ha^{-1} de N e foi aumentado linearmente quando a dose de N foi de 180 kg ha^{-1} . Com a aplicação de 60 kg ha^{-1} de N, o máximo FPP_N , de 190 kg kg^{-1} , seria obtido com a dose de 10 t ha^{-1} de gesso. Quando o N foi aplicado na dose de 120 kg ha^{-1} de N, o FPP_N foi de 90 kg kg^{-1} , independentemente da aplicação de gesso, e com 180 kg ha^{-1} de N, o máximo FPP_N obtido com a aplicação de 15 t ha^{-1} de gesso foi de 71 kg kg^{-1} . Nas parcelas sem gesso, o FPP_N com 60 kg ha^{-1} de N foi maior do que com 120 ou 180 kg ha^{-1} de N e, nas parcelas com 5, 10 ou 15 t ha^{-1} de gesso, o FPP_N seguiu a seguinte ordem de acordo com a aplicação de N: $60 \text{ kg ha}^{-1} > 120 \text{ kg ha}^{-1} > 180 \text{ kg ha}^{-1}$.

A EUN, que é obtida pelo produto entre a EF e a ERA, foi aumentada pelas doses de gesso, de forma diferenciada de acordo com as doses de N em cobertura (Figura 38). Com a aplicação de 60 e 120 kg ha^{-1} de N, o aumento na EUN em função das doses de gesso ocorreu conforme o modelo quadrático, e com 180 kg ha^{-1} de N, o aumento foi linear. Quando aplicou-se 60 kg ha^{-1} de N, a máxima EUN, de 7.780 kg kg^{-1} , seria obtida com a aplicação de $9,4 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso; com 120 kg ha^{-1} de N, a máxima EUN, de 3.108 kg kg^{-1} , seria obtida com a dose de 10 t ha^{-1} de gesso; e com 180 kg ha^{-1} de N, a máxima EUN com a aplicação de 15 t ha^{-1} de gesso seria de 2.388 kg kg^{-1} . Com a aplicação de gesso, nas doses de 5, 10 ou 15 t ha^{-1} , a EUN foi significativamente maior com o emprego de 60 kg ha^{-1} de N em relação às doses mais elevadas (120 e 180 kg ha^{-1} de N).

De modo geral, as eficiências calculadas de acordo com a aplicação de gesso foram maiores para a menor dose de N empregada (60 kg ha^{-1}). Fernandes et al. (2005) analisaram o FPP_N , a EAF e a ERA em seis híbridos de milho que receberam quatro doses crescentes de N na região de Cerrado e constataram que o aumento da dose de N diminuiu os valores das eficiências calculadas para todos os híbridos. Segundo Brown et al. (2000), a ERA e a EUN são maiores para as menores doses de N porque a porção de N recuperado pela planta geralmente decresce com o aumento da dose de N empregada. Dobermann (2005) comenta que os incrementos na produtividade de grãos se tornam menores com o aumento no suprimento de N, devido a fatores agronômicos que se tornam limitantes na medida em que se aproxima do potencial máximo produtivo. Lara Cabezas e Couto (2007) verificaram que a ERA pela cultura do milho em plantio direto foi de 82,5 e 59,9 %, após a aplicação de 80 kg ha^{-1} de N, respectivamente nas formas de sulfato de amônio e de uréia. Esses valores são da mesma ordem de grandeza dos observados no presente estudo com a aplicação de nitrato de amônio, sendo que na média das doses de gesso, a ERA foi de 90 e 45% para as doses de 60 e 120 kg ha^{-1} de N, respectivamente. Entretanto, a ERA pelo milho foi superior a 100% nas parcelas adubadas com 60 kg ha^{-1} de N e que haviam recebido 10 t ha^{-1} de gesso. Fernandes et

al. (2006) também constaram valores de ERA acima de 100% e isso pode estar relacionado ao método de cálculo empregado, ao invés da utilização do ^{15}N .

Na média das três doses de N empregadas em cobertura (60, 120 e 180 kg ha⁻¹), a aplicação de 10 t ha⁻¹ de gesso acarretou aumento de 91 para 119 kg grãos Kg⁻¹ N, em comparação com as parcelas sem gesso. Isso significa um aumento de 28 kg Kg⁻¹ grãos N, representando um acréscimo de 28% no FPP_N, muito superior ao obtido por Huggins e Pan (1993), Ma et al. (1999), Ruan et al. (2002) e Fernandes et al. (2005).

Ladha et al. (2010) realizaram levantamento de 93 estudos sobre EUN, na África, Austrália, Europa, América e Ásia. Para a cultura do milho, a análise dos dados de 61 safras revelou que, em média, a dose mundialmente utilizada para o cálculo das eficiências foi de 123 kg ha⁻¹ de N. Dessa maneira, serão comparados os valores apresentados no estudo de Ladha et al. (2010) com os valores quantificados nas eficiências obtidas com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N. A média mundial da EA (kg kg⁻¹), FPP_N (kg kg⁻¹), EAF (kg kg⁻¹) e ERA (%) para a cultura do milho foi de 24,2, 72,0, 36,7 e 65, respectivamente. Para a EA e a ERA, os valores médios obtidos no presente estudo com 120 kg ha⁻¹ de N foram de 18,2 kg kg⁻¹ e 45%, baixo da média mundial. Já, para o FPP_N e para a EAF, a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N resultou em valores de 121, 2 e 42,3 kg kg⁻¹, acima da média mundial.

O fato de os valores de EA e de ERA do presente estudo terem ficado abaixo da média mundial não significa a ocorrência de baixa EUN. Ao comparar a EUN com a média da produtividade de grãos de milho de diversos países, Cantarella e Montezano (2010) comentam que os EUA, com produtividade média de 9,2 t ha⁻¹ de milho, têm valor de EUN inferior à metade da EUN do Brasil, que possui produtividade média de grãos bem inferior (4,9 t ha⁻¹). No presente estudo, a produtividade de grãos no tratamento sem gesso foi da ordem de 9.296 kg ha⁻¹ (Figura 35). Esse valor é bastante elevado, sendo 4,5 vezes superior à produtividade média nacional de 2009, e muito maior que a produtividade média mundial (5321 kg ha⁻¹), considerando os 10 países maiores produtores de milho (CIMILHO, 2011).

De acordo com Dobermann (2005), os valores de FPP_N, EA, ERA e EF, devem ficar em torno de 40-70 kg kg⁻¹, 10-30 kg kg⁻¹, 30 a 50% e 30-60 kg kg⁻¹, respectivamente. No presente estudo, a aplicação de gesso elevou tais eficiências a valores acima do sugerido por Dobermann (2005), o que indica uma excelente prática de manejo para aumentar a EUN. O que merece ser destacado é que o aumento de 28% no FPP_N ocorreu em uma área onde esse fator já era de 91 kg kg⁻¹ grãos N, considerado excelente (DOBERMAN, 2005). Além disso, mesmo com a aplicação de 180 kg ha⁻¹ N, as doses de gesso sempre ocasionaram aumento das eficiências de N calculadas.

4.2 EXPERIMENTO REALIZADO EM COLUNAS DE SOLO

4.2.1 Atributos Químicos do Solo

A análise de variância revelou que houve diferença significativa para os valores de pH (CaCl₂) do solo entre os tratamentos sem gesso e com aplicação de gesso, na camada de 0,2-0,3 m. O gesso aplicado na superfície das colunas de solo, elevou o pH (CaCl₂) do solo nessa camada (0,2-0,3 m), independentemente da presença ou não de N (Tabela 10). Esse resultado foi acompanhado por redução na acidez potencial (H+Al) (Tabela 11) e na acidez trocável (Al³⁺) (Tabela 12) do solo, na mesma profundidade. Esses resultados diferem dos obtidos no experimento de campo, onde não se constatou nenhum efeito significativo das doses de gesso nos valores de pH (CaCl₂), e nos teores H+Al e de Al³⁺. Nas demais profundidades do solo, o pH (CaCl₂), e os teores de H+Al e de Al³⁺ não foram influenciados pela aplicação de gesso e de N.

Os teores de Ca²⁺ trocável nas colunas de solo aumentaram em todas as profundidades analisadas (Tabela 13), sendo que os maiores aumentos constatados na camada superficial do solo (0-0,1 m). Na média de todas as profundidades do solo (0,0-0,50 m), o aumento no teor de Ca²⁺ trocável proporcionada pela aplicação de 10 t ha⁻¹ gesso foi de 23,4 mmol_c dm⁻³, valor superior ao encontrado com a aplicação de 15 t ha⁻¹ de gesso no experimento de campo. Deve-se considerar que no campo, o solo foi analisado 6 meses após a

TABELA 10. Valores de pH em CaCl₂ do solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
		pH (CaCl ₂)	
		0,0-0,1m	
Sem Gesso	5,3	5,6	5,4A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	5,2	5,2	5,2A
Média	5,2a	5,4a	
		0,1-0,2 m	
Sem Gesso	5,1	5,5	5,3A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	5,3	5,2	5,3A
Média	5,2a	5,4a	
		0,2-0,3 m	
Sem Gesso	4,7	4,6	4,7B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	5,0	5,0	5,0A
Média	4,9a	4,8a	
		0,3-0,4 m	
Sem Gesso	4,3	4,3	4,3A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	4,4	4,4	4,4A
Média	4,4a	4,4a	
		0,4-0,5m	
Sem Gesso	4,3	4,3	4,3A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	4,4	4,2	4,3A
Média	4,3a	4,2a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

TABELA 11. Acidez potencial (H+Al) do solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
		H+Al (mmol _c dm ⁻³)	
		0,0-0,1m	
Sem Gesso	72,6	61,6	67,1A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	67,6	78,8	73,2A
Média	70,1a	70,2a	
		0,1-0,2 m	
Sem Gesso	79,8	70,1	75,0A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	70,9	79,6	75,2A
Média	75,4a	74,8a	
		0,2-0,3 m	
Sem Gesso	92,3	106,7	99,5A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	86,1	80,9	83,5B
Média	89,2a	93,8a	
		0,3-0,4 m	
Sem Gesso	119,0	111,0	115,0A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	103,4	107,9	105,7A
Média	111,4a	109,5a	
		0,4-0,5m	
Sem Gesso	100,3	100,6	100,5A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	94,6	112,3	103,5A
Média	97,5a	106,5a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

TABELA 12. Acidez trocável (Al³⁺ trocável) do solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
		Al ³⁺ trocável (mmol _c dm ⁻³)	
		0,0-0,1m	
Sem Gesso	0,4	0,0	0,2A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,2	0,4	0,3A
Média	0,3a	0,2a	
		0,1-0,2 m	
Sem Gesso	0,6	0,6	0,6A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,2	0,6	0,4A
Média	0,4a	0,6a	
		0,2-0,3 m	
Sem Gesso	6,4	6,8	6,6A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	3,0	2,4	2,7B
Média			
		0,3-0,4 m	
Sem Gesso	15,8	11,2	13,5A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	10,2	10,8	10,5A
Média	11a	10a	
		0,4-0,5m	
Sem Gesso	12,4	12,0	12,2A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	9,4	11,8	10,6A
Média	10,9a	11,9a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

TABELA 13. Teores de Ca^{2+} trocável no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
Ca ²⁺ trocável (mmol _c dm ⁻³)			
0,0-0,11 m			
Sem Gesso	49	52	51B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	129	114	121A
Média	89a	83a	
0,1-0,2 m			
Sem Gesso	35	56	46B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	58	68	63A
Média	47b	61a	
0,2-0,3 m			
Sem Gesso	36	29	32B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	46	55	50A
Média	40a	42a	
0,3-0,4 m			
Sem Gesso	13	15	14B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	22	21	22A
Média	17a	18a	
0,4-0,5 m			
Sem Gesso	10	9	10B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	15	12	14A
Média	12a	11a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

aplicação de gesso, tendo ocorrido nesse período um total de 1296 mm de chuvas. Com isso, deve ter ocorrido lixiviação de Ca^{2+} além do perfil do solo estudado, conforme constatado por Caires et al. (1998). No experimento em colunas, o solo foi analisado após 51 dias da aplicação de gesso, depois de um regime hídrico de 470 mm. Isso explica os menores teores de Ca^{2+} trocável encontrados no solo do experimento de campo, quando comparados aos obtidos no estudo em colunas.

A aplicação de N aumentou o teor de Ca^{2+} trocável na camada de solo de 0,1-0,2 m, independentemente da aplicação de gesso (Tabela 13). O aumento de Ca^{2+} trocável, em função das maiores doses de N aplicadas no campo, foi observado no subsolo em 0,4-0,6 m. Esse mesmo efeito, porém ocorrido em profundidades diferentes, pode ser explicado pelo fato de, no estudo de campo, a movimentação do NO_3^- ter sido mais acentuada em decorrência do maior volume de chuvas. Além disso, a menor evaporação da água no solo causada pela maior quantidade de cobertura vegetal e por temperaturas mais baixas no campo do que no ambiente protegido, pode ter favorecido a infiltração de água. Como o ânion NO_3^- acompanha o fluxo da água para as camadas mais profundas, carrega consigo os cátions (LOPES et al., 2004). É possível que a movimentação de bases, por meio da formação de pares iônicos com o nitrato no estudo em colunas, tenha ocorrido somente até a profundidade de 0,2 m.

A aplicação de gesso reduziu o teor de Mg^{2+} trocável na camada superficial do solo (0-0,1 m) e aumentou o teor do nutriente nas demais profundidades do solo, sendo que o maior incremento de Mg^{2+} com a adição de gesso ocorreu na profundidade de 0,1-0,2 m (Figura 14). A aplicação de N somente aumentou o teor de Mg^{2+} trocável no solo, na camada de 0,1-0,2 m.

A relação Ca/Mg no solo somente foi influenciada pela aplicação de gesso na camada de 0,0-0,1 m (Tabela 15), diferentemente do efeito ocorrido no campo. Nessa camada superficial, a relação Ca/Mg foi aumentada de, aproximadamente, 2 para 6, com a adição de 10 t ha⁻¹ de gesso. Já, a adubação nitrogenada causou pequeno estreitamento da relação Ca/Mg no solo, nas camadas de 0,0-0,1 e 0,4-0,6 m. Houve, também, interação significativa entre a aplicação de gesso e de N na relação Ca/Mg do solo na camada de 0,2-0,3 m, de forma que, no tratamento com gesso, a relação Ca/Mg foi maior com N do que sem N.

A análise de variância revelou interação significativa entre a aplicação de gesso e de N nos teores de K⁺ trocável no solo, nas profundidades de 0,0-0,1e 0,1-0,2 m (Tabela 16). Na camada superficial do solo (0-0,1 m), a aplicação de N proporcionou maior teor de K⁺ na ausência de gesso e menor teor de K⁺ com gesso; por outro lado, a aplicação de gesso não alterou o teor de K⁺ quando a adubação nitrogenada não foi efetuada e diminuiu o teor de K⁺ quando o N foi aplicado. Na camada de solo de 0,1-0,2 m, na ausência de gesso, a aplicação

TABELA 14. Teores de Mg^{2+} trocável no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
		Mg^{2+} trocável (mmol _c dm ⁻³)	
		0,0-0,11 m	
Sem Gesso	25	33	29A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	24	20	22B
Média	24a	27a	
		0,1-0,2 m	
Sem Gesso	20	25	23B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	29	36	32A
Média	24b	31a	
		0,2-0,3 m	
Sem Gesso	17	17	17B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	27	23	25A
Média	22a	20a	
		0,3-0,4 m	
Sem Gesso	9	8	9B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	12	12	12A
Média	11a	10a	
		0,4-0,5m	
Sem Gesso	6	8	7B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	10	10	10A
Média	8a	9a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

TABELA 15. Relação Ca/Mg no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
Relação Ca/Mg			
0,0-0,1m			
Sem Gesso	2,0	1,6	1,8B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	5,8	6,0	5,9A
Média	3,9a	3,8b	
0,1-0,2 m			
Sem Gesso	1,8	2,2	2,0A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	2,1	1,9	1,9A
Média	2,0a	2,1a	
0,2-0,3 m			
Sem Gesso	2,1Aa	1,8Aa	2,0
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	1,7Ab	2,5Aa	2,1
Média	1,9	2,1	
0,3-0,4 m			
Sem Gesso	1,3	1,9	1,6A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	1,8	1,9	1,8A
Média	1,6a	1,9a	
0,4-0,5m			
Sem Gesso	1,7	1,2	1,4A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	1,5	1,2	1,3A
Média	1,6a	1,2b	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

TABELA 16. Teores de K⁺ trocável no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
K ⁺ trocável (mmol _c dm ⁻³)			
0,0-0,1 m			
Sem Gesso	3,9Ab	4,6Aa	4,3
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	4,1Aa	2,7Bb	3,4
Média	4,0	3,6	
0,1-0,2 m			
Sem Gesso	1,4Bb	2,0Aa	1,7
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	2,2Aa	1,8Aa	2,0
Média	1,8	1,9	
0,2-0,3 m			
Sem Gesso	0,9	1,2	1,1B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	1,3	1,4	1,4A
Média	1,1a	1,3a	
0,3-0,4 m			
Sem Gesso	0,8	1,0	0,9A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	1,0	1,2	1,1A
Média	0,9a	0,7a	
0,4-0,5m			
Sem Gesso	1,0	1,4	1,2A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	1,3	1,4	1,4A
Média	1,2a	1,4a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

de N resultou em maior teor de K^+ do que sem N, e quando o N não foi aplicado o teor de K^+ foi maior com gesso do que sem gesso. Na profundidade de 0,2-0,3 m, a adição de gesso aumentou o teor de K^+ , independentemente da adubação nitrogenada, mostrando que o gesso proporcionou movimentação do K^+ no perfil do solo, como também foi observado no campo.

O comportamento da saturação por Al^{3+} no solo frente à aplicação de gesso e de N nas colunas (Tabela 17) foi muito semelhante ao obtido no experimento de campo. Por causa da baixa acidez do solo nas camadas mais superficiais do solo (0,0-0,1 e 0,1-0,2 m), os valores de saturação por Al^{3+} foram muito baixos até a profundidade de 0,2 m. A aplicação de gesso reduziu a saturação por Al^{3+} no solo, nas camadas de 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m, onde os valores eram mais elevados. A redução na saturação por Al^{3+} com a aplicação de gesso se deu em função do aumento de bases trocáveis em profundidade, embora na camada de 0,2-0,3 m, a redução no teor de Al^{3+} trocável também tenha contribuído para a redução na saturação por Al^{3+} . Carvalho e Raij (1997) também obtiveram redução na saturação por Al^{3+} no solo por meio da adição de gesso em função do aumento de bases trocáveis e de redução do Al^{3+} . Não foi observado efeito da adubação nitrogenada na saturação por Al^{3+} no perfil do solo.

Os teores de P (Mehlich 1) no solo foram fortemente influenciados pela aplicação de gesso, nas camada de 0-0,1 e 0,1-0,2 m (Tabela 18). O gesso praticamente dobrou os teores de P nessas camadas mais superficiais do solo. Comportamento semelhante, com aumento de P

TABELA 17. Saturação por Al^{3+} no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
Saturação por Al^{3+} (%)			
0,0-0,1m			
Sem Gesso	0,6	0,0	0,3A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,2	0,2	0,2A
Média	0,1a	0,4a	
0,1-0,2 m			
Sem Gesso	1,2	0,7	1,0A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,2	0,6	0,4A
Média	0,7a	0,7a	
0,2-0,3 m			
Sem Gesso	11,6	4,1	12,4A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	4,1	3,0	3,6B
Média	7,9a	8,1a	
0,3-0,4 m			
Sem Gesso	40,6	31,7	36,2A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	23,0	23,9	23,5B
Média	31,8a	27,8a	
0,4-0,5m			
Sem Gesso	42,3	38,9	40,6A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	27,1	32,6	29,8B
Média	34,7a	35,8a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

TABELA 18. Teores de P (Mehlich 1) no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
P - Mehlich 1 (mg dm ⁻³)			
0,0-0,1m			
Sem Gesso	22,8	16,4	19,6B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	44,9	34,6	39,7A
Média	33,8a	25,5a	
0,1-0,2 m			
Sem Gesso	15,0	6,8	10,9B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	18,6	22,6	20,6A
Média	14,7a	16,8a	
0,2-0,3 m			
Sem Gesso	1,9	1,2	1,6A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	2,5	2,4	2,4A
Média	2,2a	1,8a	
0,3-0,4 m			
Sem Gesso	0,9	0,9	0,9A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,9	0,6	0,7A
Média	0,9a	0,7a	
0,4-0,5m			
Sem Gesso	0,5	0,4	0,5A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,5	0,4	0,5A
Média	0,5a	0,4a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

no solo, principalmente nas camadas mais superficiais do solo, em decorrência da aplicação de gesso, também foi constatado no experimento de campo. A adubação nitrogenada não exerceu influência nos teores de P nas colunas de solo, assim como já havia sido observado no campo.

A aplicação de gesso ocasionou redução significativa nos teores de N-NO₃⁻ no solo, nas camadas de 0,2 a 0,5 m (Tabela 19). A maior redução de N-NO₃⁻ no solo com a adição de gesso, de 13,9 mg dm⁻³, ocorreu na camada de 0,2-0,3 m. Na média das camadas de 0,2 a 0,5m, a redução de N-NO₃⁻ no solo foi de 9,1 mg dm⁻³. Resultados semelhantes de redução de nitrato no solo após a aplicação de gesso também foram constatados por Carvalho e Raij (1997). Os teores de N-NO₃⁻ no solo foram aumentados com a adubação nitrogenada em todas as camadas do perfil, exceto na camada de 0,1-0,2 m, na qual não houve alteração no teor de N-NO₃⁻ com a aplicação de N. O aumento mais expressivo no teor N-NO₃⁻ no solo com a adubação nitrogenada, de 13,8 mg dm⁻³, ocorreu na camada de 0,2-0,3 m. Com a adubação nitrogenada, houve tendência de aumento nos teores de N-NO₃⁻ no solo com o aumento da profundidade, mostrando que o íon nitrato apresenta rápida movimentação no perfil do solo. Destaca-se, ainda, que na média do perfil do solo (0,0-0,50 m), os teores de N-NO₃⁻ tiveram o mesmo comportamento daquele observado nas maiores profundidades, ou seja, foram reduzidos com a aplicação de gesso e aumentados com a adubação nitrogenada. O aumento

TABELA 19. Teores de N-NO₃⁻ no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
		N-NO ₃ ⁻ (mg dm ⁻³)	
		0,0-0,1m	
Sem Gesso	20,6	31,9	26,3A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	21,9	28,4	25,1A
Média	21,3b	30,1a	
		0,1-0,2 m	
Sem Gesso	28,4	35,7	32,0A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	25,9	32,3	29,1A
Média	27,1a	34a	
		0,2-0,3 m	
Sem Gesso	29,7	45,8	37,8A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	19,5	28,5	23,9B
Média	24,6b	37,1a	
		0,3-0,4 m	
Sem Gesso	32,4	46,6	39,5A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	25,9	35,7	30,8B
Média	29,2b	41,2a	
		0,4-0,5m	
Sem Gesso	29,9	45,0	37,4A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	27,8	37,8	32,8B
Média	28,9b	41,4a	
		0,0-0,5 m	
Sem Gesso	28,2	41,0	34,6A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	24,2	32,5	28,4B
Média	26,2b	36,8a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

médio no teor de N-NO₃⁻, de 26,2 para 36,8 mg dm⁻³, com a adubação nitrogenada, mostra que a aplicação de 180 kg⁻¹ de N promoveu incremento de 10,6 mg dm⁻³ de N-NO₃⁻ nas colunas de solo. Por outro lado, a adição de gesso proporcionou redução média no teor de N-NO₃⁻ de 34,6 para 28,4 mg dm⁻³, ou seja, houve diminuição de 6,2 mg dm⁻³ de N-NO₃⁻ nas colunas de solo com a aplicação de 10 t ha⁻¹ de gesso.

De acordo com van Raij (2008), o nitrato pode atuar como agente complementar ao gesso na redução da acidez do subsolo, pois esse ânion é considerado um veículo de transferência de alcalinidade da camada superficial para o subsolo. Isso porque quando há movimentação de nitrato, este carrega uma porção de bases equivalentes (Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺), por meio da formação de pares iônicos. Como as plantas absorvem mais nitrato do que cátions básicos, após movimentação dos pares iônicos formados para as camadas mais profundas do solo, o nitrato poderá ser absorvido, liberando os cátions básicos percolados (van Raij, 2008). Esse efeito pode ser visualizado claramente no estudo em colunas de solo onde ocorreu aumento de Ca²⁺ (Tabela 13), Mg²⁺ (Tabela 14) e K⁺ (Tabela 16) na camada de 0,1-0,2 m, sendo esta a única camada em que não houve aumento de N-NO₃⁻ proveniente da adubação

nitrogenada (Tabela 19). Assim, o NO_3^- deve ter carregado cátions básicos da camada superficial do solo (0-0,1 m) e, ao chegar na camada de 0,1-0,2 m, o íon nitrato deve ter sido absorvido pelas planta, liberando os cátions.

O teor de sulfato no solo foi influenciado pela interação significativa entre a aplicação de gesso e de N, nas camadas de 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m (Tabela 20). Nas demais profundidades do solo, os efeitos do gesso e da adubação nitrogenada ocorreram de forma independente. Os teores de S-SO_4^{2-} no solo aumentaram até a profundidade de 0,5 m, sendo os maiores aumentos observados nas camadas superficiais do solo. A interação significativa ocorrida, tanto na camada de 0,2-0,3 m como na de 0,3-0,4 m, foi em função do teor de sulfato no tratamento com gesso ter sido menor com a adição de N do que sem N. Cabe ressaltar que, na profundidade de 0,3-0,4 m, a adubação nitrogenada reduziu em mais da metade o teor de S-SO_4^{2-} no solo, no tratamento que recebeu gesso. Apesar de a tendência do sulfato em solos tropicais é de se acumular em camadas do subsolo, no presente estudo realizado em colunas as maiores concentrações de sulfato foram encontradas nas camadas superficiais do solo. Essa pequena movimentação de sulfato no perfil do solo certamente aconteceu por causa do período relativamente curto de ação do gesso aplicado (51 dias) após um regime hídrico de apenas 470 mm.

TABELA 20. Teores de S-SO_4^{2-} (NH_4OAc)₂ no solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
		S-SO_4^{2-} (NH_4OAc) ₂ (mg dm ⁻³)	
		0,0-0,1m	
Sem Gesso	10	7	9B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	319	294	306A
Média	164a	150b	
		0,1-0,2 m	
Sem Gesso	11	11	11B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	174	221	197A
Média	92a	116a	
		0,2-0,3 m	
Sem Gesso	12Ba	12Ba	12
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	222Aa	192Ab	207
Média	116	102	
		0,3-0,4 m	
Sem Gesso	13Ba	17Ba	15
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	93Aa	44Ab	69
Média	53	31	
		0,4-0,5m	
Sem Gesso	12	17	15B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	29	40	35A
Média	20b	29a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

4.2.2 Atributos de crescimento radicular do milho

A aplicação de gesso agrícola influenciou fortemente a densidade de raízes e o comprimento radicular por unidade de área superficial de solo, principalmente em profundidade, mostrando que a melhoria da fertilidade do subsolo promovida pela adição de gesso beneficiou o crescimento das raízes do milho cultivado nas colunas de solo. A adubação nitrogenada também influenciou o crescimento radicular do milho, em menor magnitude quando comparada ao gesso, e teve seus efeitos mais concentrados na camada superficial.

A análise de variância não revelou interação significativa entre a aplicação de gesso e de N para a densidade de comprimento de raízes de milho, discordando com os resultados obtidos no experimento de campo. Entretanto, houve efeito independente da adição de gesso e da adubação nitrogenada na densidade de comprimento de raízes de milho (Figura 39). O fertilizante nitrogenado proporcionou maior densidade de raízes até 0,2 m de profundidade, não exercendo efeito em maiores profundidades do solo, enquanto a aplicação de gesso aumentou a densidade radicular em camadas do subsolo (0,2 a 0,5 m).

A aplicação de gesso, de modo diferente do que foi observado no experimento de campo, proporcionou distribuição mais uniforme do sistema radicular do milho nas colunas de solo (Figura 40). O percentual do comprimento de raízes de milho foi significativamente reduzido, na camada de 0,0-0,2 m, e aumentado, na camada de 0,4-0,5m, com a aplicação de

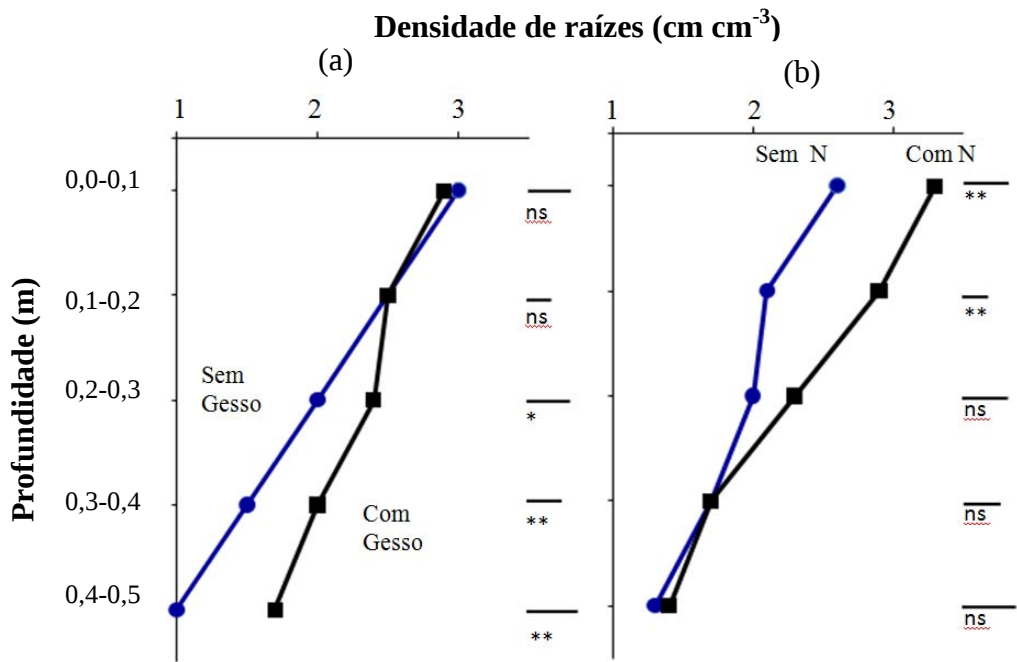


FIGURA 39. Densidade de comprimento de raízes de milho, em função da aplicação de gesso (a) e de nitrogênio (b) nas colunas de solo. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey ($P = 0,05$). ns: não-significativo, *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.

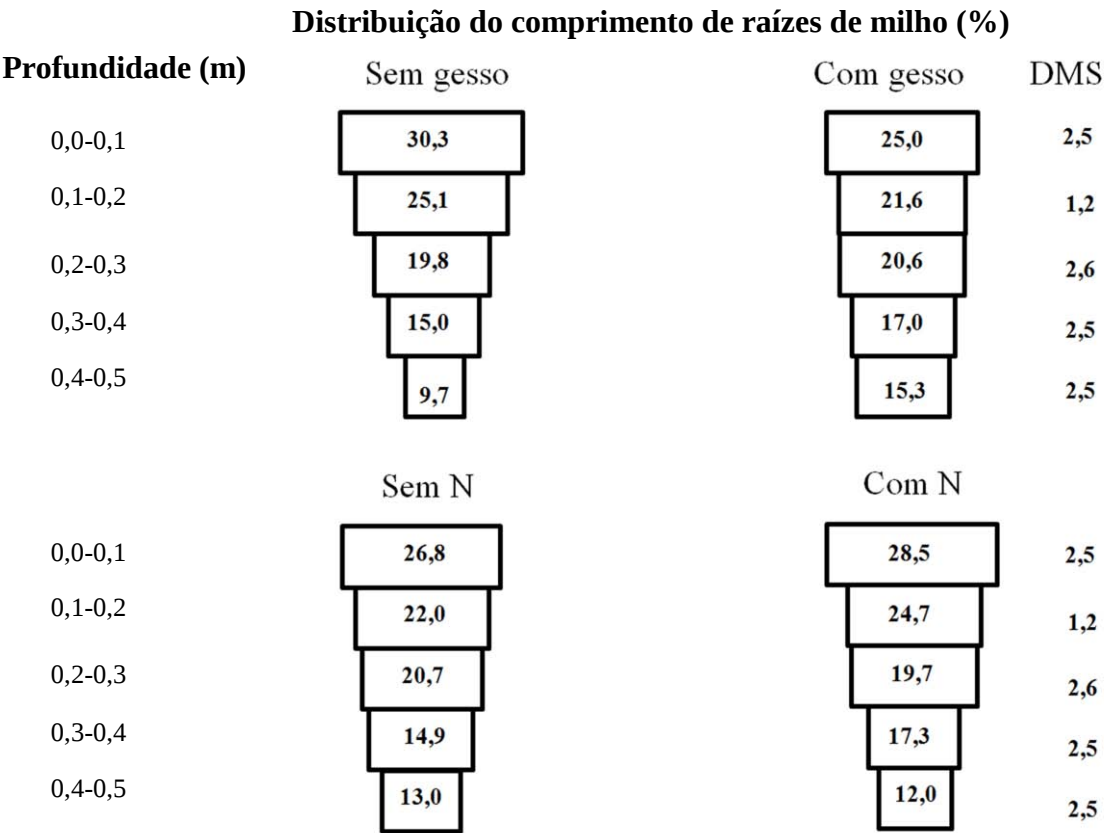


FIGURA 40. Percentual do comprimento de raízes de milho no perfil do solo, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio nas colunas de solo. DMS = diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P = 0,05$)

gesso. A adubação nitrogenada somente ocasionou pequeno aumento percentual do comprimento radicular na profundidade de 0,1-0,2 m. Quando se compara a distribuição das raízes ao longo do perfil do solo nos estudos em campo e em colunas de solo, nota-se que houve melhor distribuição do sistema radicular do milho no estudo realizado em colunas de solo. Isso deve ter sido decorrente de condições mais favoráveis às perdas de água do solo das camadas superficiais no experimento em colunas de solo em relação ao estudo de campo, como menor umidade do ar, maior temperatura e maior evapotranspiração, considerando que no estudo em colunas não havia cobertura de palha nos tubos do solo.

Da maneira semelhante à que ocorreu no experimento de campo, houve interação significativa entre a aplicação de gesso e de N para o comprimento radicular por área, até a profundidade de 0,5 m (Figura 41). O gesso promoveu aumento no comprimento radicular, da ordem de 30 cm cm^{-2} , somente na presença de adubação nitrogenada. Quando o N não foi aplicado, este efeito do gesso não foi observado. Quando o gesso foi adicionado, a adubação nitrogenada promoveu aumento significativo no comprimento radicular, da ordem de 33 cm cm^{-2} . Sem a aplicação de gesso, a adubação nitrogenada não alterou o comprimento das raízes. Esses resultados mostraram que, isoladamente, nenhum dos tratamentos foi capaz de

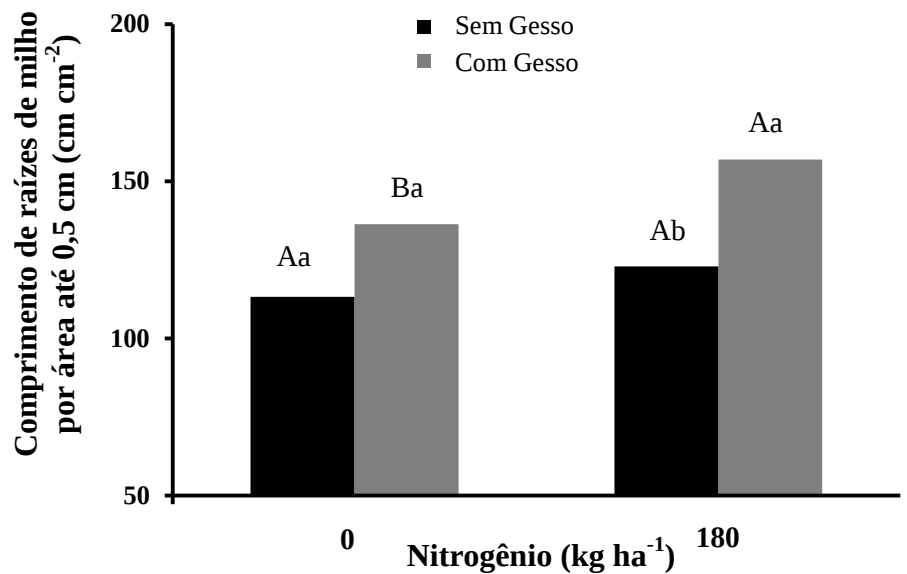


FIGURA 41. Comprimento de raízes de milho por área, até a profundidade de 0,5 m, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio nas colunas de solo. Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de nitrogênio, e minúsculas para a aplicação de gesso, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

aumentar o comprimento das raízes até 0,5 m, e somente a combinação da aplicação de gesso com a adubação nitrogenada foi eficiente para melhorar o comprimento radicular do milho.

Calculando-se as médias do comprimento de raízes de milho por área de todos os tratamentos, nos experimentos de campo (0,0-0,6 m) e em colunas (0,0-0,5 m), obtiveram-se valores de comprimento radicular de 47 e 132 cm cm⁻², respectivamente. Essa diferença não deve ter sido em função do maior volume de solo nas colunas, pois no campo foram coletadas 6 subamostras por profundidade. Isso deve ter acontecido pela possibilidade de as raízes, no campo, se distribuírem lateralmente, enquanto nas colunas ficaram confinadas a um determinado espaço. Isso explicaria a diferença na magnitude dos resultados obtidos, sendo que a aplicação de gesso no campo proporcionou aumento de 76% no comprimento radicular, enquanto que, nas colunas, o incremento foi da ordem de 20%.

O raio médio das raízes de milho foi influenciado pela aplicação de gesso somente na camada de 0,2-0,3 m, tendo o gesso diminuído o raio médio das raízes (Tabela 21). Esse efeito esteve relacionado com o aumento no pH do solo, com consequente redução no teor de Al^{3+} trocável, proporcionado pelo gesso nessa profundidade (Tabela 12). Efeito da redução na toxidez de Al com a aplicação de gesso, com consequente melhoria no crescimento radicular, foi também observado por Saigusa, Toma e Nanzyo (1996) em plantas de cevada. O engrossamento de raízes pelo Al se deve ao fato da existência de cargas elétricas negativas na parede celular das células das raízes, as quais favorecem a interação com o Al^{3+} , de forma que o Al^{3+} desloca o Ca^{2+} , o qual é essencial para a estabilidade da parede celular. Como consequência dessa troca de cátions (Ca^{2+} por Al^{3+}) na parede das células, tem-se maior

TABELA 21. Raio médio de raízes de milho, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
Raio Médio (mm)			
0,0-0,1 m			
Sem Gesso	0,24	0,20	0,22A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,22	0,26	0,24A
Média	0,23a	0,23a	
0,1-0,2 m			
Sem Gesso	0,21	0,18	0,20A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,14	0,19	0,16A
Média	0,18a	0,19a	
0,2-0,3 m			
Sem Gesso	0,23	0,20	0,22A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,15	0,16	0,15B
Média	0,19	0,18	
0,3-0,4 m			
Sem Gesso	0,23	0,21	0,22A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,16	0,18	0,17B
Média	0,19	0,20	
0,4-0,5m			
Sem Gesso	0,20	0,26	0,23A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,18	0,21	0,20A
Média	0,19	0,23	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P = 0,05).

rigidez e menor capacidade de expansão celular, acarretando em engrossamento das raízes (Kochina, Piñeros e Hoeknga 2005). Caires et al. (2002) observaram que a melhoria nas condições de acidez do solo proporcionaram raízes mais finas nas plantas de trigo.

Os aumentos nos teores de Ca²⁺ trocável e de S-SO₄²⁻ disponível foram os principais responsáveis pela maior densidade de comprimento das raízes em camadas do subsolo (Tabela 22) e pelo maior comprimento radicular do milho (Tabela 23). O efeito benéfico do Mg²⁺ no crescimento radicular, observado na camada de 0,4-0,6 m no campo, ocorreu na camada de 40,0-0,050, nas colunas de solo. Maior efeito do Ca²⁺ em relação ao Mg²⁺ no crescimento de raízes foi evidenciado por Da Silva et al. (2005) ao constatarem que o

TABELA 22. Coeficientes de correlação linear entre a densidade de comprimento de raízes de milho e os atributos químicos do solo, em função da profundidade.

Profundidade	Ca ²⁺ trocável	Mg ²⁺ trocável	Saturação por Ca ²⁺	Saturação por Mg ²⁺	Relação Ca/Mg	S-SO ₄ ²⁻ NH ₄ OAc
m						
0,0-0,1	0,01ns	0,03ns	0,01ns	0,02ns	0,01ns	0,02ns
0,1-0,2	0,36*	0,26ns	0,01ns	0,02ns	0,05ns	0,05ns
0,2-0,3	0,54**	0,02ns	0,41*	0,01ns	0,28ns	0,20ns
0,3-0,4	0,62**	0,10ns	0,58*	0,09ns	0,19ns	0,32*
0,4-0,5	0,46*	0,43*	0,39*	0,40**	0,20ns	0,57**

ns: não-significativo, *: P < 0,05 e **: P < 0,01.

TABELA 23. Coeficientes de correlação linear entre o comprimento de raízes por área, até a profundidade de 0,50 m, e os atributos químicos do solo.

Profundidade m	Ca ²⁺ trocável	Mg ²⁺ trocável	Saturação por Ca ²⁺	Saturação por Mg ²⁺	Relação Ca/Mg	S-SO ₄ ²⁻ NH ₄ OAc
0,0-0,5	0,74**	0,24ns	0,67**	0,25ns	0,22ns	0,69**

ns: não-significativo,**: *P* < 0,01.

incremento no sistema radicular da soja com a adição de 2 mmol de Ca foi muito superior ao incremento proporcionado pela adição de 20 mmol de Mg. A relação Ca/Mg não exerceu influência no crescimento das raízes de milho, tendo em vista que a relação entre os cátions praticamente não se alterou de nas camadas de solo de 0,1 a 0,5 m.

4.2.3 Matéria seca (MS) e Extração de Nutrientes pelas Plantas de Milho

A produção de matéria seca da parte aérea do milho cultivado nas colunas de solo teve resposta similar à observada no campo. A adubação nitrogenada não influenciou significativamente a produção de matéria seca, enquanto a aplicação de gesso acarretou em maior quantidade de matéria seca produzida pelas plantas de milho (Tabela 24). Carvalho e Raij (1997) também verificaram que a aplicação de gesso aumentou a produção de matéria seca das plantas de milho em cinco diferentes tipos de solo.

TABELA 24. Produção de matéria seca da parte aérea do milho, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
	Matéria seca (g planta ⁻¹)		
Sem Gesso	4,5	4,8	4,7B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	6,5	7,4	6,9A
Média	5,5a	6,1a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (*P* = 0,05).

A produção de matéria seca da parte aérea do milho cultivado nas colunas de solo esteve significativamente (*P* < 0,01) correlacionada com a densidade de comprimento de raízes nas camadas de 0,2-0,3 m (*r* = 0,50), 0,3-0,4 m (*r* = 0,65) e 0,4-0,5m (*r* = 0,54), e com o comprimento radicular por área, até a profundidade de 0,5 m (*r* = 0,69). A maior disponibilidade de Ca²⁺ trocável e de S-SO₄²⁻ em todas as camadas de solo ao longo das colunas favoreceu a produção de matéria seca da parte aérea do milho (Tabela 25). Em profundidade (0,4-0,5m), a redução na saturação por Al³⁺ e o aumento no teor de Mg²⁺ também beneficiaram a produção de matéria seca da parte aérea do milho. Tais resultados foram relativamente semelhantes aos observados no experimento de campo.

TABELA 25. Coeficientes de correlação linear entre a produção de matéria seca da parte aérea do milho cultivado em colunas de solo e os atributos químicos do solo, em função da profundidade.

Atributo	Profundidade (m)	Matéria seca (kg ha ⁻¹)
Ca ²⁺ trocável	0,0-0,1	0,48**
	0,1-0,2	0,34**
	0,2-0,3	0,50**
	0,3-0,4	0,47**
	0,4-0,5	0,64**
Mg ²⁺ trocável	0-0,1	-0,32**
	0,1-0,2	0,40**
	0,2-0,3	0,20ns
	0,3-0,4	0,09ns
	0,4-0,5	0,45**
Saturação por Al ³⁺	0-0,1	0,02ns
	0,1-0,2	0,04ns
	0,2-0,3	0,23ns
	0,3-0,4	0,25ns
	0,4-0,5	-0,42**
S-SO ₄ ²⁻ [NH ₄ OAc]	0-0,1	0,56**
	0,1-0,2	0,75**
	0,2-0,3	0,55**
	0,3-0,4	0,28**
	0,4-0,5	0,48**

ns: não-significativo e **: P < 0,01.

A aplicação de gesso aumentou a extração de N, P, K, Ca e S, enquanto a adubação nitrogenada aumentou a extração de N, pela parte aérea do milho (Tabela 26). A extração de Mg pela parte aérea do milho foi influenciada pela interação entre a aplicação de gesso e de N, de forma que a extração de Mg pela parte aérea foi aumentada pela adição de gesso na presença de adubação nitrogenada e também pelo emprego de N na presença de gesso. Os resultados de extração de Mg pela parte aérea do milho, no estudo em colunas de solo, foram diferentes daqueles obtidos no experimento de campo, no qual as doses de gesso reduziram a extração de Mg pelas plantas (Figura 30). A provável explicação para essa divergência de resultados é que, no experimento de campo, a aplicação de gesso diminuiu os teores de Mg²⁺ trocável até a profundidade de 0,2 m e, no estudo em colunas de solo, a diminuição no teor de Mg²⁺ trocável ocorreu somente na camada de 0-0,1 m, e houve incremento no teor do nutriente a partir dos 0,1 m de profundidade. Aumentos na extração de N, P, K, Ca e S com a aplicação de gesso também foram observados por Carvalho e Raij (1997), em plantas de milho, e por Caires, Feldhaus e Blum (2001), em plantas de cevada.

TABELA 26. Extração de nutrientes pela parte aérea do milho, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
		N (mg planta ⁻¹)	
Sem Gesso	66,1	91,9	79,0A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	112,5	159,6	136,0B
Média	89,3a	125,7b	
		P (mg pl ⁻¹)	
Sem Gesso	2,0	1,7	1,8B
Com Gesso	5,1	6,4	5,8A
Média	3,6a	4,0a	
		K (mg planta ⁻¹)	
Sem Gesso	22,9	28,9	25,9B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	38,8	42,5	40,6A
Média	30,8a	35,7a	
		Ca (mg planta ⁻¹)	
Sem Gesso	13,8	12,4	13,1B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	19,0	25,6	22,3A
Média	16,4a	19,0a	
		Mg (mg planta ⁻¹)	
Sem Gesso	5,3Aa	4,0Ba	4,6
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	3,6Ab	6,9Aa	5,3
Média	4,5	5,4	
		S (mg planta ⁻¹)	
Sem Gesso	2,8	2,8	2,8B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	8,4	11,1	9,8A
Média	5,6a	7,0a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (*P* = 0,05).

Apesar do aumento ocorrido no teor de N-NO₃⁻ no solo (Tabela 19) e na extração de N pela planta de milho com a adubação nitrogenada (Tabela 26), não foi observada correlação significativa entre o teor de N-NO₃⁻ no solo e a extração de N pelo milho. Considerando os tratamentos com e sem gesso que receberam adubação nitrogenada (G₀N₁ e G₁N₁), obteve-se relação negativa entre o teor de N-NO₃⁻ no solo, nas camadas de 0,3-0,4 e 0,4-0,5m, e a absorção de N pelo milho (Figura 42). Nota-se claramente que os menores teores de N-NO₃⁻ nas camadas do subsolo (0,3-0,4 e 0,4-0,5m) estiveram associados aos maiores valores de extração de N pela planta. Isso indica que o menor teor de N-NO₃⁻ nas camadas do subsolo se deu em função de maior absorção de N pela planta, uma vez que o solo e a planta foram coletados ao mesmo tempo, diferentemente do que ocorreu no campo. Dessa forma, quando os teores de N-NO₃⁻ no solo eram mais altos em razão da adubação nitrogenada, a aplicação de gesso favoreceu a absorção de N-NO₃⁻ do subsolo pela planta de milho, em decorrência de maior crescimento e aprofundamento do sistema radicular causado pela diminuição na saturação por Al³⁺. Além disso, o maior teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo com a adição de gesso também deve ter favorecido, pelo menos em parte, a absorção de N-NO₃⁻ do subsolo,

considerando que as correlações entre o teor de $S-SO_4^{2-}$ no solo e a absorção de N pelo milho foi significativa nas camadas de 0,3-0,4 m ($r = 0,45$) e 0,4-0,5m ($r = 0,51$).

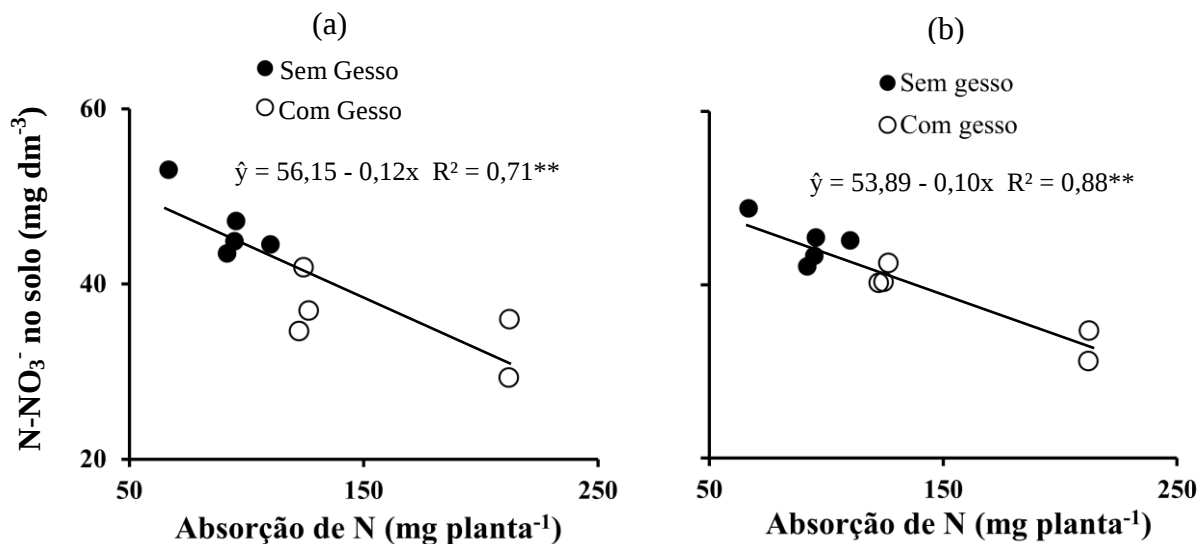


FIGURA 42. Relações entre o teor de $N-NO_3^-$ no solo, nas profundidades de 0,3-0,4 m (a), e 0,4-0,5m (b), e a quantidade de N absorvida pelo milho cultivado nas colunas de solo. **: $P < 0,01$.

4.2.4 Lixiviação de Nutrientes

A aplicação de gesso diminuiu o volume de extrato lixiviado contido nos coletores, indicando que a adição de gesso proporcionou maior absorção de água pela planta de milho (Tabela 27). Destaca-se que a produção de matéria seca da parte aérea de milho apresentou correlação negativa ($P < 0,01$) com volume de extrato quantificado nos coletores ($r = -0,48$), indicando que o volume lixiviado foi menor nas colunas de solo em que houve maior produção de matéria seca de milho. A adubação nitrogenada não alterou significativamente o volume de extrato lixiviado nos coletores.

Os teores de Ca e de $S-SO_4^{2-}$ no extrato lixiviado foram aumentados com a aplicação de gesso (Tabela 27). Esse efeito já era esperado, uma vez que o gesso agrícola é fonte de Ca e de $S-SO_4^{2-}$, e sua principal ação se dá em camadas subsuperficiais, em razão da alta mobilidade do sulfato no solo. Brown et al. (2000) estudaram a lixiviação de íons após a aplicação de sulfato de amônio e verificaram que a lixiviação de $S-SO_4^{2-}$ no solo foi três vezes maior com a adição do fertilizante em relação ao tratamento controle. Cabe ressaltar no presente estudo que, mesmo com o aumento no teor de $S-SO_4^{2-}$ proveniente do gesso no extrato lixiviado, de 1,61 para 9,95 mg L^{-1} , esse valor encontra-se bem abaixo daquele considerado nocivo à saúde humana, de 83,00 mg L^{-1} (BROWN et al., 2000). Em outro estudo

TABELA 27. Volume de extrato lixiviado e teores de nutrientes nos coletores, em função da aplicação de gesso e de nitrogênio no estudo em colunas de solo.

Gesso	Sem N	Com N (180 kg ha ⁻¹)	Média
		Extrato lixiviado (ml tubo ⁻¹)	
Sem Gesso	543,00	584,00	563,50A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	465,00	413,00	439,54B
Média	504,00a	498,50a	
		N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	
Sem Gesso	7,32Ab	11,45Aa	9,43
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	6,84Aa	6,37Ba	6,56
Média	7,02	8,92	
		P (mg L ⁻¹)	
Sem Gesso	0,17	0,13	0,15A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,08	0,11	0,09A
Média	0,12a	0,12a	
		K (mg L ⁻¹)	
Sem Gesso	0,012	0,006	0,009A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,010	0,010	0,010A
Média	0,011a	0,008a	
		Ca (mg L ⁻¹)	
Sem Gesso	0,35	0,51	0,43B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,78	0,57	0,67A
Média	0,57a	0,54a	
		Mg (mg L ⁻¹)	
Sem Gesso	0,40	0,40	0,40A
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	0,60	0,40	0,50A
Média	0,50a	0,40a	
		S-SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	
Sem Gesso	1,55	1,66	1,61B
Com Gesso (10 t ha ⁻¹)	10,05	9,86	9,95A
Média	5,80a	5,76a	

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas para a aplicação de gesso nas colunas, e minúsculas para a aplicação de N nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P = 0,05$).

realizado em colunas com sete tipos de solo e doses de gesso equivalentes a 5, 10 e 20 t ha⁻¹ (ERNANI et al., 2006), verificou-se lixiviação de Ca²⁺ com as doses de gesso aplicadas. Entretanto, nesse estudo, observou-se também que a aplicação de gesso ocasionou lixiviação de Mg²⁺ e K⁺, o que não foi constatado no presente estudo realizado em colunas de solo. No experimento de campo, houve movimentação de Mg²⁺ e K⁺ além dos 0,5 m de profundidade, com a aplicação de 10 t ha⁻¹ de gesso. Destaca-se, porém, que tais efeitos podem variar em função do tipo de solo, da dose de gesso empregada, da precipitação pluvial e do tempo de reação do gesso no solo.

A concentração de N-NO₃⁻ no extrato lixiviado foi influenciada significativamente pela interação entre as doses de gesso e de N (Tabela 27). A interação revelou que a adubação nitrogenada somente elevou o teor de N-NO₃⁻ no lixiviado no tratamento sem gesso. Isso aconteceu porque a aplicação de gesso reduziu o teor de N-NO₃⁻ no lixiviado quando o N foi aplicado. Considerando os tratamentos com e sem gesso que receberam adubação nitrogenada

(G₀N₁ e G₁N₁), obteve-se relação negativa entre o teor de N-NO₃⁻ quantificado nos coletores e a absorção de N pelo milho (Figura 43). Assim, quanto mais N foi absorvido pela planta, menor foi o teor de N-NO₃⁻ nas camadas do subsolo (Figura 42) e também na solução lixiviada (Figura 43), mostrando claramente que a aplicação de gesso reduziu a lixiviação de N-NO₃⁻ proveniente da adubação nitrogenada por aumentar a absorção de N pela planta.

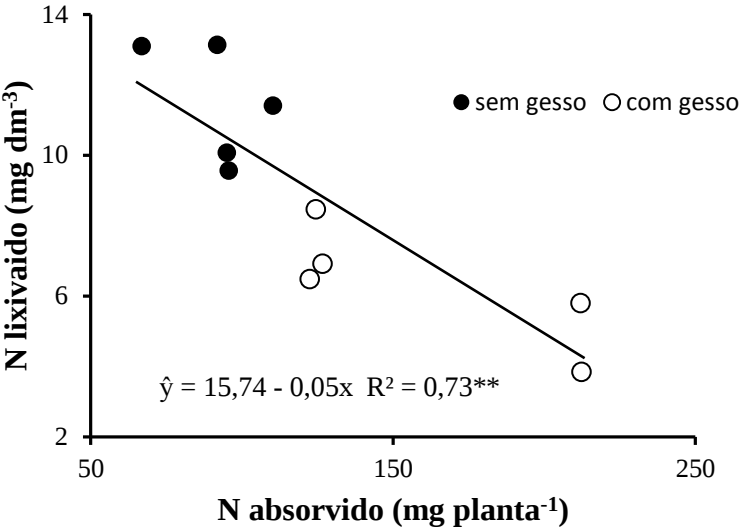


FIGURA 43. Relação entre o teor de N-NO₃⁻ quantificado nos coletores e a quantidade de N absorvida pelo milho cultivado nas colunas de solo. **: $P < 0,01$.

O teor de N-NO₃⁻ na solução lixiviada foi negativamente ($P < 0,01$) correlacionado com o comprimento radicular do milho por área, até a profundidade de 0,5 m ($r = -0,71$). Sendo assim, o aumento na absorção de N pela planta ocasionado pela aplicação de gesso que culminou em menor teor de NO₃⁻ na solução lixiviada, foi decorrente de maior crescimento do sistema radicular. Destaca-se ainda que a lixiviação do N-NO₃⁻ no solo também pode ser reduzida pela presença de S, conforme constatado por Brown et al. (2000). Nesse estudo, a menor lixiviação de N-NO₃⁻, ocasionada pela presença do S, foi decorrente de maior absorção de N pelas plantas.

A lixiviação de N-NO₃⁻ no solo tem sido destacada em vários trabalhos como é um sério problema do ponto de vista agrícola e ambiental. Alcantara e Camargo (2010a,b) verificaram que o NO₃⁻, em baixas concentrações no solo, se movimenta mais lentamente do que em altas concentrações; além disso, sob intenso regime de lixiviação, pode-se esperar que todo ou quase todo o NO₃⁻ seja perdido. Mantovani, Ernani e Sangoi (2007) realizaram estudo de lixiviação de nitrato em colunas com diferentes fontes de N, e constaram que praticamente todo o nitrato adicionado foi perdido nas primeiras percolações de água, e que as fontes nítricas apresentaram maior potencial de lixiviação de N-NO₃⁻. Bertolol (2005) também

verificou que todo o nitrato adicionado na forma nítrica nas colunas de solo foi lixiviado. Sampaio et al. (2010) evidenciaram grande potencial poluente do N-NO_3^- porque a sua facilidade de movimentação no solo permite o alcance do lençol freático. Em um estudo de lixiviação de N-NO_3^- realizado no campo com três doses de N (22, 100 e 134 kg ha^{-1} de N), durante três safras de milho, em dois tipos de solo (um muito argiloso e outro arenoso), Sogbedji et al. (2000) observaram que a lixiviação de nitrato não foi intensificada com o aumento da dose de N de 22 para 100 kg ha^{-1} ; entretanto, quando a dose de N foi aumentada de 100 para 134 kg ha^{-1} , ocorreu aumento de 30% na lixiviação do N-NO_3^- . Nesse estudo, verificou-se também maior lixiviação de N-NO_3^- no solo arenoso. Na Holanda, Oenema et al. (2010) coletaram 170 amostras em poços de fazendas produtoras de milho e pastagens que recebiam adubação nitrogenada, durante os anos de 1998 a 2005. As amostras coletadas nos poços dos campos de milho apresentaram os maiores teores de N-NO_3^- , sendo que 80% delas tinham teores maiores que considerados críticos (50 mg L^{-1}), em decorrência da utilização de doses acima de 140 kg ha^{-1} de N.

O encontrado mais importante desse estudo foi a comprovação de que o uso de gesso minimiza perdas de N-NO_3^- por lixiviação por aumentar a absorção de N pelas plantas, ocasionando melhoria na eficiência da adubação nitrogenada e contribuindo para o aumento da sustentabilidade da produção de milho.

5. CONCLUSÕES

A aplicação superficial de gesso em sistema plantio direto aumentou os teores de Ca^{2+} , S-SO_4^{2-} e P no solo, e ocasionou movimentação de Mg^{2+} e K^+ das camadas superficiais para o subsolo. A aplicação de N em cobertura, nas doses de 120 e 180 kg ha⁻¹, elevou o teor de N-NO_3^- e causou movimentação de Ca^{2+} e K^+ em profundidade.

A adição de gesso aumentou a densidade de comprimento radicular do milho em todo o perfil do solo, acarretando maior comprimento radicular da cultura, em decorrência de aumento no teor de Ca^{2+} e de redução na saturação por Al^{3+} nas camadas subsuperficiais do solo. A adubação nitrogenada também beneficiou o crescimento das raízes de milho.

A melhoria da fertilidade do subsolo proporcionou maior crescimento radicular, o qual acarretou em maior absorção, extração e exportação de nutrientes pela cultura do milho. A redução de Mg^{2+} na camada superficial do solo resultou em menor absorção do nutriente pela cultura do milho.

A produtividade de grãos de milho foi aumentada com a aplicação de gesso e com a adubação nitrogenada de cobertura na dose de 180 kg ha⁻¹. A maior produtividade de milho esteve relacionada com o aumento na massa dos grãos, e foi ocasionada pelo maior crescimento radicular resultante da melhoria nas condições químicas do perfil do solo, principalmente pelo aumento nos teores de Ca^{2+} e de S-SO_4^{2-} , e pela redução na saturação por Al^{3+} .

A maior absorção de N pelo milho decorrente da aplicação de gesso foi a principal responsável pelo aumento na produtividade de grãos, sendo que o maior crescimento e aprofundamento do sistema radicular, e o aumento do S-SO_4^{2-} ao longo do perfil do solo acarretaram maior absorção de N-NO_3^- pelo milho, reduzindo suas perdas por lixiviação.

Os maiores valores de produção de matéria seca, de extração de nutrientes e de produtividade de grãos foram obtidos com doses de gesso superiores a 10 t ha⁻¹, mostrando que a cultura do milho pode ser beneficiada com a aplicação de altas doses de gesso.

Os valores das eficiências no uso do N pela cultura do milho foram maiores com a menor dose de N empregada e tiveram influencia positiva das doses de gesso. A aplicação de gesso se mostrou uma importante prática para maximizar o uso de N pela cultura do milho.

6. REFERÊNCIAS

- ABREU, C.A; RAIJ, B. van; ABREU, M.F.; Paz-Gonzalez, A. Routine soil testing to monitor heavy metals and boron in soils. **Sci. Agric.**, v.62, p.564-571, 2005.
- ALCÂNTARA, M. A. K.; CAMARGO, O. A. Manipulação de carga e movimento de nitrato em horizontes B de um Latossolo Vermelho **Pesq. agropec. bras.**, v.45, p.204-212, 2010a.
- ALCÂNTARA, M. A. K.; CAMARGO, O. Movimentação de nitrato em horizonte superficial e subsuperficial de Latossolo e Nitossolo com cargas variáveis **Pesq. agropec. bras.**, v.45, p.81-88, 2010b.
- ALVAREZ, V.H.; ROSCOE, R. KURIHARA, H.K.; PEREIRA, F.P. Enxofre. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Viçosa, MG; p.596-635, 2007.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.26, p.241-248, 2002.
- AMANULLAH; HASSAN, M. J.; NAWAB K.; ALI ASAD Response of Specific Leaf Area (SLA), Leaf Area Index (LAI) and Leaf Area Ratio (LAR) of Maize (*Zea mays* L.) To Plant Density, Rate and Timing of Nitrogen Application. **World Appl. Sci. J.** v.3 p.235-243, 2007.
- ANDRADE, C.L.; ALBUQUERQUE, P.E.R.; BRITO, R.A.L.; RESENDE, M. Variabilidade e manejo da irrigação da cultura do milho. **Circular Técnica da Embrapa**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Circular 85, 2006.
- ARGENTA, G.; DA SILVA P. R. F.; BORTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Relação da leitura do clorofilometro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Bras. Fisiol. Veg.**, v.13, p.158-167, 2001.
- BATISTA, K. **Nitrogênio e enxofre na implantação do capim-Marandu em substituição ao capim-Braquiária em degradação num solo com baixa matéria orgânica**. 2006, 126 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Quieroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2006.
- BATISTA, K.; MONTEIRO F. A. Sistema Radicular do Capim Marandu, Considerando as Combinações de doses de Nitrogênio e de Enxofre. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, p.821-828, 2006.

BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. 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**. Guarapuava FAPA, p.151-169, 2006.

BERTOL, O.J. **Contaminação da água de escoamento superficial e da água percolada pelo efeito da adubação mineral e orgânica em sistema de semeadura direta**. 2005, 209 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Parana, Curitiba, 2005.

BLUM, J; CAIRES, E. F.; AYUB, A. R., DA FONSECA, A. F.; SOZIM, M. & FAUATE, M.: Soil Chemical Attributes and Grape Yield as Affected by Gypsum Application in Southern Brazil, **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v.42, p.1434-1446, 2011.

BROWN, L.; SCHOLEFIELD, D. JEWKES, E. C.; PREEDY, N. WADGE, K.; BUTLER, M. The effect of sulphur application on the efficiency of nitrogen use in two contrasting grassland soils. **J. Agric. Sci.**, v.135, p.131-138, 2000.

CABEZAS, W. A. R. L.; COUTO, P. A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura do milho, no sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, p.739-752, 2007.

CAIRES, E. F. Manejo da Acidez do Solo. In: PROCHNOW, L.I; CASARIN, V.; STRIPP, S.R. **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes** Piracicaba, SP: IPNI-Brasil, v.1, p.281-338, 2010.

CAIRES, E. F.; CHUERI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEREDO, 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**, v.22, p.27-34, 1998.

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**, v.27, p.275-286, 2003.

CAIRES, E.F.; CHURKA, S.; GARBUIO, F.J.; FERRARI, R.A.; MORGANO, M.A. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. **Sci. Agric.**, v.63, p.370-379, 2006.

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Sci. Agric.**, v.59, p.357-364, 2002.

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v.60, p.213-223, 2001.

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 plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.315-327, 1999.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. **Bragantia**, v.59, p.213-220, 2000.

CAIRES, E. F. ; JORIS, H. A. W. ; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use Manag.**, v.27, p.45-53, 2011.

CAIRES, E.F.; KUSMAN, M.T.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; PADILHA, J.M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.125-136, 2004.

CAIRES, E. F.; MASCHIETTO, E. H. G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. W. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Sci. Agric.**, v.68, p.209-216, 2011.

CAMPOS A. X. **Fertilização com sulfato de amônio na cultura do milho em um solo do cerrado de Brasília sob pastagens de Brachiaria decumbens**. 2004,131 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Quieroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.

CANTARELLA H.; MONTEZANO. F.Z. Nitrogênio e Enxofre. In: PROCHNOW, L.I; CASARIN, V.; STRIPP, S.R. **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba, SP: IPNI-Brasil, v.2, p.1-46, 2010.

CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L.I. Determinação de sulfato em solos. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, E.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, p.225-230,2001.

CANTARELLA, H.; TREVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método de destilação a vapor. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, E.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 285p. 2001.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.

CARVALHO, M.C.S.; VAN RAIJ, B. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant Soil**, v.192, p.37-48, 1997.

CHURKA, S. **Atributos químicos de um latossolo e comportamento do trigo e da soja no sistema plantio direto influenciados pela aplicação e reaplicação de gesso agrícola**.2007,74f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2007.

CIMILHO, **Centro de inteligência do Milho**. Disponível em <<http://cimilho.cnpms.embrapa.br/estatisticas/estatisticas.php?tabela=021>>. Acesso em: 15 de Abril 2011.

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas., Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 30 Dez. 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=2009>>. Acesso em 10 Out. 2011.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**, Produção de milho, 2008/2009. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=10>>. Acesso em 10. Jul. 2010.

DA SILVA, I. R.; CORRÊA, T. F. C.; NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. ; RUFTY, T.; SILVA, E. F.; GEBRIM, F.O.; NUNES, F. N. Location and Crop Species Influence the Magnitude of Amelioration of Aluminum Toxicity by Magnesium. **R. Bras. Ci. Solo**, v.33, p.65-76, 2009.

DA SILVA, I. R.; CORRÊA, T. F. C.; NOVAIS, R. F.; GEBRIM, F.O.; NUNES, F. N.; SILVA, E. F.; SMYTH, T. J. Protective effect of divalent cations against aluminum toxicity in soybean. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.2061-2071, 2008.

DA SILVA, I. R.; FERRUFINO, A.; SANZONOWICZ, C. ; SMYTH, T.J.; ISRAEL, D.W; CARTER JÚNIOR, T.E. Interactions between Magnesium, Calcium, and Aluminum on soybean root elongation. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.747-754, 2005.

DAUBRESSE, C. M.; VEDELE, F.O. D.; DECHORGNAT, J.; CHARDON, F.; GAUFICHON, L.; SUZUKI, A. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. **Ann. of Bot.**, v.105, p.1141-1157, 2010.

DAVIS, R. L.; PATTON, J. J.; TEAL, R. K.; TANG, Y.; HUMPHREYS, M. T.; MOSALI, J.; GIRMA, K.; LAWLES, J. W.; MOGES, S. M.; MALAPATI, A.; SI, J.; ZHANG, H.; DENG, S.; JOHNSON, G. V.; MULLEN, R. W.; RAUN, W. R. Nitrogen balance in the magruder plots following 109 years in continuous winter wheat. **J. Plant Nut.**, v.8, p.1561-1580, 2003.

DEKALB SEMENTES. **Características dos híbridos**. Disponível em: <http://www.dekalb.com.br/milho.aspx> Acesso em: 05 Maio 2010.

DOBERMANN, A. Nitrogen Use Efficiency – State of the Art1. **IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers**, Frankfurt, Germany p.18, 2005.

DUARTE, J. O.; CRUZ, J. C.; GARCIA, J. C.; MATTOSO, M. J. **Cultivo do Milho** Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesTML/Milho/CultivodoMilho_6ed/economia.htm>. Acesso em: 5 maio 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 212p. 1997.

ERNANI, P. R.; MIQUELLUTI, D. J.; FONTOURA, S. M. V.; KAMINSKI, J.; AND ALMEIDA, J. A. Downward movement of soil cations in highly weathered soils caused by addition of gypsum, **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v.37, p.571-586, 2006.

FAGERIA, N. K. . Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.** (Online), v.2, p.6-16, 1998.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop efficiency **Adv. Agron.**, v.88, p. 1-89, 2005.

FARINA, M.P.W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G.R. A comparison of strategies for ameliorating sub soil acidity: II. Long-term soil effects. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.64, p.652-658, 2000.

FAO (Food and Agriculture, Organization) 2004. FAO agricultural database FAO, Rome, Italy, Disponível em <<http://www.fao.org>>. Acesso em 10/03/2011.

FANCELLI, A.L. Nitrogênio e Enxofre. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STRIPP, S.R. **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes** Piracicaba, SP: IPNI-Brasil, v.3, p.43-89, 2010.

FEBRAPDP.-Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha – Febrapdp. Brasil- Evolução da Área Cultivada em Plantio Direto. <http://www.febrapdp.org.br/arquivos/BREvolucaoPD2002a2006.pdf>. Acesso em 08/03/2011.

FELDHAUS, I.C. **Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem superficial e à adubação nitrogenada realizada na aveia em sistema plantio direto**. 2006, 94f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2004

FERNANDES, F C S.; LIBARDI, P. L.; SILVA, M. M . Efeito da adubação nitrogenada nas propriedades químicas de um latossolo, cultivado com milho em sucessão à aveia preta, na implantação do sistema do plantio direto. **Acta Scient**, v.29, p.639-647, 2007.

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

FOLONI, J.S.S; LIMA, S.L. de.; BÜLL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, p.49-57, 2006.

FRANCISCO, A.D.M **Eficiência de fontes de nitrogênio e enxofre na composição químico-bromatológica e algumas características agrônômicas da cultura de milho (Zea mays L.) em sistema de plantio direto**. 2008, 129f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade de São Paulo Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga, 2008.

FUNDAÇÃO ABC. Pesquisa e Desenvolvimento Agropequário, **Departamento de Agrometeorologia**. Castro, 2011.

GARNETT, T.; CONN, V.; KAISER, B. N. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants **Plant, Cell Environ.**, v.32, p.1272-1283, 2009.

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

GRAUER, U.E. & HORST, W.J. Modeling cation amelioration of aluminium phytotoxicity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.56, p.166-172, 1992.

GYÓRI, Z.N. Sulphur content of winter wheat grain in long term field experiments. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v.36, p.373-382, 2005.

GOMES, R. F.; SILVA A. G., ASSIS, R.L.; PIRE, F. R. Efeitos de doses e da época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agrônômicos da cultura do milho sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, p.931-938, 2007.

HOFMAN, G.; VAN CLEEMPUT, O. **Soil and Plant Nitrogen**. Paris, International Fertilizer Industry Association, p 30. 2004.

HOWARD, D.D.; ESSINGTON, M.E. Effects of surface-applied limestone on the efficiency of urea-containing nitrogen sources for no-till corn. **Agron. J.**, v.90, p.523-528, 1998.

HUGGINS, D. R.; PAN, W. L. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity **Agron. J.**, v.85 p.898-905, 1993.

IAPAR Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?Conteudo=863>>, Acesso: 17 Abr. 2011.

ILLERA, V.; GARRIDO, F.; SERRANO, S.; GONZALEZ, M. T Immobilization of the heavy metals Cd, Cu and Pb in an acid soil amended with gypsum and lime-rich industrial by-products. **Europ. J. Soil Sci.**, v.55, p.135–145, 2004.

JACKSON, G. D. Effects of nitrogen and sulfur on canola yield and nutrient uptake. **Agron. J.**, v.92, p.644-649, 2000.

JORIS, H.A.W. **Atributos químicos do solo e comportamento da sucessão milho-trigo-soja após longo período da aplicação de calcário e gesso em sistema plantio direto**. 2008, 47f. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Agronomia) Monografia. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.

KALMBACHER, R. S.; EZENWA, I. V.; ARTHINGTON, J. D.; MARTIN, F. G. Sulfur fertilization of bahia grass with varying levels of nitrogen fertilization on a Florida Spodosol. **Agron. J.**, v.97, p.661-667, 2005.

KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; HOEKENGA, O. A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. **Plant Soil**. v.274 p.175-195, 2005.

LADHA, J. K.; PATHAK, H.; KRUPNIK, Z. J.; SIX, J.; KESSEL C. V. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospect and prospects. **Agron. J.**, v.87, p. 1-71, 2010.

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

LIU, K.; WIATRAK, P. Corn (*Zea Mays* L.) Plant Characteristics and Grain Yield Response to N Fertilization Programs in No-Tillage System. **Am. J. Agric. Biol. Sci.**, v.6, p.172-179, 2011.

LOPES, A.S.; BASTOS, A.R.R.; DAHER, E. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados e sulfatados na agricultura brasileira: uma visão do futuro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. **Nitrogênio e Enxofre na Agricultura Brasileira**. Piracicaba, SP: IPNI-Brasil, p.161-186. 2007.

LOPES, A.S.; WIETHOLTNER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo, Editora ANDA, 2004. 110p.

MA, B. L., DWYER L.M., GREGORICH, E. G. Soil nitrogen amendment effects on nitrogen uptake and grain yield of maize. **Agron. J.**, v.91 p.650-656. 1999.

MAENE, L. M. 6th INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION, PARIS. Efficient Fertilizer Use and its Role in Increasing Food Production and Protecting the Environment. **AFA INTERNATIONAL ANNUAL CONFERENCE CAIRO, EGYPT**. 31 January - 3 February, 2000.

MALAVOLTA, E.; MORAES, F.M. O Nitrogênio na Agricultura brasileira. **Série de estudos e documentos SED-70**, Versão Provisória CETEM/CT 2006.

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

MALHIA, S.S.; GRANT, C.A.; JOHNSTON, A.M.; GILL, K.S. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. **Soil Till. Res.**, v.60 p.101-122, 2001.

MALUF, H. J. G. M.; CAMPOS, D. S.; MELO, P. F.; MALUF, G. E. G. M. Gesso agrícola em solos do Cerrado brasileiro. **II Semana de Ciência e Tecnologia IFMG**, Campus Bambuí. II Jornada Científica, 19 a 23 de Outubro de 2009.

MANTOVANI, A. ; ERNANI, P. R. ; SANGOI, L. . A Adição de Superfosfato Triplo e a Percolação de Nitrogênio no Solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, p.887-895, 2007.

MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T.; CARMELLO, Q.A.C.; GALLO, P.B.; AMBROSANO, G.M.B. Calcário e potássio para a cultura da soja. **Sci. Agric.**, v.57, p.445-449, 2000.

MASCHIETTO, E, H, G. **Gesso na produção de milho e soja em solo de alta fertilidade e baixa acidez em subsuperfície em plantio direto**. 2009, 58f, Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2009.

MATULA, J.; PECHOVA, M. The influence of gypsum treatment on the acquirement of nutrients from soils by barley. **Plant, Soil Environ.**, v.53, p.89-96, 2007.

MALUF, H. J. G. M.; CAMPOS, D. S.; MELO, P. F.; MALUF, G. E. G. M. Gesso agrícola em solos do Cerrado brasileiro. **II Semana de Ciência e Tecnologia IFMG**, Campus Bambuí. II Jornada Científica, 19 a 23 de Outubro de 2009

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

MIYAZAWA, M. PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Resíduos vegetais: influência na química de solos ácidos. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, Ponta Grossa, 2000. **Anais**. Ponta Grossa, Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, p.82-94, 2000.

NAKAMURA, K.; HARTER, T.; HIRONO, Y.; HORINO, H.; MITSUNO, T. Assessment of root zone nitrogen leaching as affected by irrigation and nutrient management practices. **Soil Sci. Soc. Am.** v.3, p.1353-1366, 2004.

NOGUEIRA, A.R.A.; MOZETO, A.A. Interações químicas do sulfato e carbonato de cálcio em seis solos paulistas sob vegetação de cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, v.14, p.1-6, 1990.

OENEMA, J.; BURGERS, S.; VERLOOP, K.; HOOIJBOER, A.; BOUMANS, L.; TEN BERGE, H. Multiscale effects of management, environmental conditions, and land use on nitrate leaching in dairy farms. **J. Environ. Qual.**, v.39, p.2016-28, 2010.

OLIVEIRA, R. H.; ROSOLEM, C. A.; TRIGUEIROR, R. M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28 p.439-445, 2004.

PAGANI, A.; ECHEVERRÍA, H. E.; ANDRADE, F. H. ROZAS, H. R. S. Characterization of corn nitrogen status with a greenness index under different availability of sulfur. **Agron. J.**, v.101, p.315-322, 2009.

PAULETTI, V. Adubação nitrogenada no sistema plantio direto. Simpósio sobre fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto., 1, Ponta Gross, 2000. Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais / Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2000. p.122-136.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKY, H.C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, 1992. 38p. (Circular, 76).

PAOLINELLI, M.T.; OLIVEIRA, P.M.; SÁ SANTOS, P.R.R.; LEANDRO, V.P.; MORAES, W.V. Aplicação direta do fosfato. In: I SEMINÁRIO DO FOSFOGESSO NA AGRICULTURA.1985,Brasília,1985. **Anais...** Brasília p.197-207, 1986.

EACOCK, S.;RIMMER, D.L.. The suitability of an iron oxide-rich gypsum by-product as a soil amendment. **J. Environ. Qual.**, v.29, p.1969-1975, 2000.

PENG. S, CASSMAN, K. G.; KROPFF, M. J. Relationship between leaf photosynthesis and nitrogen content of field-grown rice in tropics. **Crop Sci.**, v.35, p.1627-1630, 1995.

PEREIRA FILHO, P, R, S. **Alterações químicas do solo e resposta da soja a calagem superficial e a adubação nitrogenada na aveia preta em sistema plantio direto**. 2008, 48f. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Agronomia) Monografia. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.

PURCINO, A. A. C.; CARVALHO, A. V. M.; NETTO, P. SIDNEY; BELELE, C. L.; LOPES, L. L. Aluminum effects on nitrogen uptake and nitrogen assimilating enzymes in maize genotypes with contrasting tolerance to aluminum toxicity. **J. Plant Nut.**, v.26, p.31-61, 2003.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C.; CORRÊA, L. A.; SILVA, A. G.; CANTARELLA, H. Lixiviação de nitrato em pastagem de *coastcross* adubada com nitrogênio. **R. Bras. Zootec.**, v.35, p.683-690, 2006.

QUAGGIO, J.A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 111p, 2000.

RAMBO, L. ; SILVA, P. R. F. ; BAYER, C. ; ARGENTA, G. ; STRIEDER, M. L.; SILVA, A. Alves da . Teor de nitrato como indicador complementar da disponibilidade de nitrogênio no solo para o milho. **R. Bras. Ci. Solo** , v.31, p.731-738, 2007.

RHEINHEIMER, D. DOS S.; ALVAREZ, J. W. R.; OSORIO FILHO, B. D.; DA SILVA L. S.; BORTOLUZZI, E. C.; Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ci. Rural**, v.35, p.562-569, 2005.

REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface applied amendments. **Agrochemophysica**, v.4, p.1-6, 1972.

RIBEIRO, JR E. S.; DIAS, L. E.; ALVAREZ, V. H.; V.; MELLO J. W. V., e W. L. DANIELS Dynamics of sulfur fractions in Brazilian soils submitted to consecutive harvests of sorghum. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.65, p.787-794, 2001.

RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah Oxisol. **Agron. J.**, v.72, p.40-44, 1980.

ROCKSTROM, J. A safe operating space for humanity. **Nature**, v.461, p.472-476, 2009.

ROZAS, H.S.; ECHEVERRIA, H.E.; STUDDERT, G.A.; ANDRADE, F.H. No till maize nitrogen uptake and yield: effect of urease inhibitor and application time. **Agron. J.**, v.91, p.950-955, 1991.

RUAN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agron. J.**, v.91, p.357-363, 1999.

RAUN, W. R.; SOLIE, J. B.; JOHNSON, G. V.; STONE, M. L.; MULLEN, R. W.; FREEMAN, K. W.; THOMASON, W. E.; LUKINA, E.V. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agron. J.**, v.94, p.815-820, 2002.

RUTHERFORD, P.M.; DUDAS, M.J.; SAMEK, R.A. Environmental impacts of phosphogypsum. **Sci Total Environ**, v.149 p.1-38 1994.

SÁ, J. C. M. . Sistema de produção de milho visando alta produtividade na região dos Campos Gerais no Centro-Sul do Paraná. In: L. T. Bull; H. Cantarella. (Org.). **Cultura do milho** - fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, SP: POTAFÓS, v.1, 1993. p.249-279.

SÁ, J. C. M.; CARDOSO, G. E.; SANTOS, J. B.; OLIVEIRA, A. F. FERREIRA, C. F. MASSINHAM, A. SIUTA JUNIOR, D.; SÁ, F. M. M. Manejo de Fertilizantes Nitrogenados em Sistemas de Produção envolvendo os cultivos de Soja/Trigo e Soja/Milho no Sistema Plantio Direto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. **Nitrogênio e Enxofre na Agricultura Brasileira**. Piracicaba, SP: IPNI-Brasil, 2007. p.567-637.

SAIGUSA, M.; TOMA, M.; NANZYU M Alleviation of subsoil acidity in nonallophanic andosols by phosphogypsum application in topsoil. **Soil Sci. Plant Nut.**, v.42, p.221-227, 1996.

SALDANHA, E. C. M.. Gesso mineral em cana de açúcar: Efeitos no solo e na planta. 2005.56f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Programa de Pós-Graduação. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Pernambuco, 2005.

SALVAGIOTTI, F.; CASTELLARÍN, M.; MIRALLES D.J.; PEDROL. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. **Field Crops Res.**, v.113, p.170-177, 2009.

SAMPAIO, S. C.; CAOVIOLA, F. A., OPAZO, M. U.; NÓBREGA, L. H. P.; SUSZEK, M.; A. SMANHOTTO. Lixiviação de íons em colunas de solo deformado e indeformado. **Eng. Agríc.**, v.30, p.150-159, 2010.

SANGOI, L.; ENDER, M.; GUIDOLIN, A. F.; ALMEIDA, M. L.; KONFLANZ, V. A. Nitrogen fertilization impact on agronomic traits of maize hybrids released at different decades, **Pesq. agropec. bras.**, v.36, p.757-764, 2001.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; SILVA, P. R. F. Maize response to nitrogen fertilization timing at two tillage systems in a high organic matter content soil. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, p.507-517, 2007.

SANZONOWICZ C.; SMYTH, T.J. & ISRAEL, D.W. Calcium alleviation of hydrogen and aluminum inhibition of soybean root extension from limed soil into acid subsurface solutions. **J. Plant Nut.**, v.21, p.785-804, 1998.

SHENK, M.K.; BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agron. J.**, v.71, p.921-924, 1979.

SCHMIDT, J.P., A.J. DEJOIA, R.B. FERGUSON, R.K. TAYLOR, R.K. YOUNG, AND J.L. HAVLIN. . Corn yield response to nitrogen at multiple in-field locations. **Agron. J.**, v.94, p.798-806. 2002.

SCHROEDER, J.J.; NEETESON, J.J.; OENEMA, O.; STRUIK, P.C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production?, Reviewing the state of the art. **Field Crops Res.**, v.66, p.151-164, 2000.

SCHULTHESS, U.; FEIL, B.; JUTZI, S. C.. Yield-independent variation in grain nitrogen and phosphorus concentration among Ethiopian wheats. **Agron J.**, v.89, p.497-506, 1997.

SILVA, D.J.; VENEGAS, V.H.A.; RUIZ, H.A.; SANT'ANNA, R.. Translocation and redistribution of sulphur in corn and soybean plants. **Pesq. agropec. bras.**, v.38, p.715-721, 2003.

SILVEIRA P,C. **Doses de nitrogênio e de enxofre para a recuperação de pastagem com capim-braquiária: atributos de parte aérea, raízes e fertilidade do solo.** 2009 125f. . Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Quieroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2009.

SINCLAIR, T. R.; VAD, V. Physiological traits for crop yield improvement in low N and P Environments. **Plant Soil**, v.245, p.1-15, 2002.

SINGH, V.; SINGH, B.; SINGH, Y.; THIND, H. S.; GUPTA, R. K. Need based nitrogen management using the chlorophyll meter and leaf colour chart in rice and wheat in South Asia: a review **Nutr. Cycl. Agroecosyst.**, v.88 p.361-380, 2010.

SMIL, V. Nitrogen in crop production: An account of global flows. **Global Biogeochem. Cycles**, v.13, p.647-662, 1999.

SOCOLOW, R. H. Nitrogen management and the future of food: Lessons from the management of energy and carbon. Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, Princeton, **Proc. Natl. Acad. Sci. USA** 96, 1999.

SOGBEDJI, J. M.; VAN ES H.M.; YANG, C.L.; GEOHRING, L. D.; MAGDOFF, F. R. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type. **J. Environ. Qual.**, v.29, p.1813-1820, 2000.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado**. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2005. 19p.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L N DE.; OLIVEIRA,A.S. Acidez do solo e sua correção. IN: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**.Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.205-275.

SOUSA, D.M.G.; RITCHEY, K.D. Uso de gesso no solo de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1., Brasília, 1986. **Anais**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1986. p.119-144.

SPIERTZ J.H.J; Nitrogen, sustainable agriculture and food security: a review. **Agro. Sustain Dev.**, v.30, p.43-55, 2009.

SUMNER, M.E.. Gypsum as an ameliorant for the subsoil acidity syndrome. Final Report, Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, FL, 1990. p.1-56

TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **J. Ecol.**, v.63, p.995-1001, 1975.

TOMA, M.; SUMNER, M. E.; WEEKS, G.; SAIGUSA, M. Long term effects of gypsum on crop yield and subsoil chemical properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.63, p.891-895, 1999.

UMAR, A. S.; IQBAL, M. Nitrate accumulation in plants, factors affecting the process, and human health implications: a review **Agron. Sustain. Dev.**, v.27, p.45–57, 2007.

VALLE, S. R.; PINOCHET J. C. D. CALDERINI, D. F. Grain yield, above-ground and root biomass of Al-tolerant and Al-sensitive wheat cultivars under different soil aluminum concentrations at field conditions. **Plant Soil**, v.318 p.299-310, 2009.

VAN RAIJ, B.. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1991. 343p.

VAN RAIJ, B.. **Gesso na agricultura**. Campinas, Instituto Agronômico, 2008. 233p.

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; FURLANI, P.R. Efeito, na reação do solo, da absorção de amônio e nitrato pelo sorgo, na presença e na ausência de gesso. **R. Bras. Ci. Solo**, v.12, p.131-136, 1988.

VAN RAIJ, B. Melhorando o Ambiente Radicular em Subsuperfície. In: PROCHNOW, L.I; CASARIN, V.;STRIPP, S.R **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba, SP: IPNI-Brasil, v.1., 2010. p.351-380.

RAIJ, B. van & PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.36, p.587-593, 1972.

VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C.; MALAVOLTA, E.; DIAS, A. S.; SERRANO, C. G. E. **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. São Paulo, 2008. 104p.

VOLNEI, P. Adubação nitrogenada no sistema plantio direto: bases para o manejo sustentável. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 2000. Ponta Grossa, **Anais...** Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, p. 122-144, 2000.

WADT, P, G, S. Alterações eletroquímicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Tratado com Carbonato e Sulfato de Cálcio. **Sci. Agric.**, v.57, p.519-524, 2000.

ZAMBROSII, F. C. B.; L. ALLEONI, R. F.; CAIRES E. F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ci. Rural**, v.37, p.110-117, 2007.

ZARDO FILHO, R. **Acidez e comportamento da soja pela calagem na superfície e cobertura de aveia e adubação nitrogenada no sistema plantio direto** 2008, 58f. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Agronomia) Monografia. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.

ZOTARELLI, L.; CARDOSO, E. G.; PICCININ, J. L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; TORRES, E.; ALVES, B. J. R. NOTAS CIENTÍFICAS. Calibração do medidor de clorofila Minolta SPAD-502 para avaliação do conteúdo de nitrogênio do milho. **Pesq. agropec. bras.**, v.38, p.1117-1122, 2003.

ZHU, Z.L. CHEN, D.L. Nitrogen fertilizer use in China – Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.**, v.63, p.117-127, 2002.