

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

ADRIANO HALISKI

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA
INFLUENCIADOS PELA CALAGEM SUPERFICIAL E ADUBAÇÃO
NITROGENADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

**PONTA GROSSA - PR
2015**

ADRIANO HALISKI

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA
INFLUENCIADOS PELA CALAGEM SUPERFICIAL E ADUBAÇÃO
NITROGENADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

**PONTA GROSSA - PR
2015**

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

H172 Haliski, Adriano
Atributos químicos do solo e produtividade da soja influenciados pela calagem superficial e adubação nitrogenada no sistema plantio direto/ Adriano Haliski. Ponta Grossa, 2015.
59f.

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

1.Glycinemax (L.) Merrill. 2.Calcário dolomítico. 3.Nitrogênio. 4.Acidez do solo. 5.Produção relativa. I.Caires, Eduardo Fávero. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Agronomia. III. T.

CDD: 631.84



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Atributos químicos do solo e produtividade da soja influenciados pela calagem superficial e adubação nitrogenada no sistema plantio direto”.**

Nome: Adriano Haliski

Orientador: Eduardo Fávero Caires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Prof. Dr. Jeferson Zagonel

Pesquisador Dr. Gabriel Barth

Data da Realização: 19 de fevereiro de 2015.

Aos meus queridos pais, Basilio e Olga

A minha amada esposa, Daniele

Dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

À Deus que me concedeu o dom da vida e a capacidade e motivação para realizar esse trabalho.

Aos meus pais, Basilio e Olga, pelo apoio em todos os momentos de minha vida.

À minha esposa Daniele, pela amizade, compreensão e companheirismo.

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 Professor Dr. Eduardo Fávero Caires, pela excelente orientação, dedicação, ensinamentos e oportunidades oferecidas, por confiar a mim a condução de projetos de pesquisa e por estar sempre disposto a fazer o possível para uma melhor formação.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela dedicação exemplar, em especial aos professores Adriel Ferreira da Fonseca e Ricardo Antonio Ayub, pelo trabalho extraordinário na coordenação do curso.

À técnica do Laboratório de Fertilidade do Solo Dirce Aparecida de Oliveira, pela amizade, carinho e auxílio na realização das análises químicas.

Ao proprietário da Fazenda Estância dos Pinheiros, Guilherme Soares, por ceder a área para realização do experimento.

A todos os colegas da pós-graduação, pelo companheirismo e amizade que levarei por toda vida.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Fertilidade do Solo: Danilo Augusto Scharr, Angelo Rafael Bini, Shively Los Galetto, Bruno Fernando de Oliveira Lourenço, Rayane Rodrigues França, Leonardo Fetzer, Maicon Elivelton Hildebrant, Alisson Marcos

Fogaça, Rafael Pangratz Bedretchuk, Felipe Bueno Moreira, Alan Jean Rafael Pinto de Oliveira e Alessandro Gruzka Levandoski pela grande amizade, companheirismo e auxílio na realização desse trabalho. Aos amigos Renato Zardo Filho e Hélio Antonio Wood Joris, pela amizade e ajuda.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

EPIGRAFES

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

(Albert Einstein)

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”

(José de Alencar)

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA INFLUENCIADOS PELA CALAGEM SUPERFICIAL E ADUBAÇÃO NITROGENADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

RESUMO

A adubação nitrogenada pode aumentar a eficiência da calagem superficial na correção da acidez do solo e beneficiar a produção das culturas em longo prazo no sistema plantio direto. Como no sistema plantio direto os teores de matéria orgânica são elevados, especialmente nas camadas superficiais do solo, a toxicidade de alumínio (Al) pode ser baixa, mesmo em condições de alta acidez. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as alterações químicas do solo, a produtividade, e os níveis críticos para o desenvolvimento da cultura da soja após aplicação superficial de calcário e de nitrogênio amoniacal (N-NH₄NO₃) nas culturas antecessoras de outono-inverno. O experimento foi realizado em Ponta Grossa (PR), em um Latossolo Vermelho distrófico textura média manejado há 26 anos sob plantio direto no momento da instalação. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas, foram aplicadas, em maio de 2004, quatro doses de calcário dolomítico na superfície (0, 4, 8 e 12 t ha⁻¹) e, nas subparcelas, foram aplicadas, anualmente, desde 2004, quatro doses de N-NH₄NO₃ (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) em cobertura nas culturas de aveia preta ou trigo. Na rotação de culturas foram utilizados milho, soja ou feijão na estação de primavera-verão e aveia preta ou trigo na estação de outono-inverno. A soja foi cultivada em novembro de 2007 (cv. CD 214 RR), 2009 (cv. CD 206 RR), 2010 (cv. BMX Apolo RR), 2012 (cv. NA 5909 RG) e 2013 (cv. BMX Ativa RR). Amostras de solo foram coletadas anualmente, antes da semeadura de soja, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. A aplicação superficial de calcário elevou o pH e os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis, e reduziu o teor de Al³⁺ trocável até a profundidade de 0,20 m. A adubação nitrogenada diminuiu o pH e os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis, principalmente até a profundidade de 0,10 m, e elevou o teor de Al³⁺ trocável até a profundidade de 0,20 m. A aplicação superficial de calcário aumentou a produtividade de grãos de soja para todas as doses de N-NH₄NO₃ empregadas nas culturas de aveia preta ou trigo. Nas parcelas sem calagem, a acidificação provocada pela adubação nitrogenada limitou severamente a produtividade de grãos de soja. Os níveis críticos de pH em CaCl₂, saturação por bases, Al³⁺ trocável e saturação por Al³⁺, na camada de 0-0,20 m, para a produção de soja foram 4,9, 33%, 8,0 mmol_c dm⁻³ e 30%, respectivamente. A calagem na superfície mostrou ser uma prática fundamental para garantir altos tetos de produtividade de soja quando altas doses de nitrogênio amoniacal são aplicadas com frequência no sistema plantio direto.

Palavras-Chave: *Glycine max* (L.) Merrill, calcário dolomítico, nitrogênio, acidez do solo, produção relativa, níveis críticos.

SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND SOYBEAN YIELD AS AFFECTED BY SURFACE APPLICATION OF LIME AND NITROGEN FERTILIZATION UNDER A NO-TILL SYSTEM

ABSTRACT

Nitrogen fertilization can increase the efficiency of surface liming on soil acidity correction and benefit crop production in long term no-till systems. Because the soil organic matter content under no-till is high, especially in the soil surface layers, the aluminum (Al) toxicity may be low, even in high acidity conditions. This study was carried out with the purpose of evaluate the soil chemical attributes, grain yield, and critical levels for the development of soybean after surface application of lime and ammoniacal nitrogen (N-NH₄NO₃) in crops of autumn-winter predecessors. The experiment was conducted in Ponta Grossa, Parana State, Brazil, on a loamy, kaolinitic, thermic Typic Hapludox (Oxisol) under long term continuous no-till (26 years). The experimental design used was a randomized block, in a split plot arrangement, with three replications. In the plots, were applied, in May 2004, four rates of lime on the soil surface (0, 4, 8, and 12 t ha⁻¹) and, in the subplots, were applied annually, since 2004, four rates of N-NH₄NO₃ (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹) in top dressing in the black oat or wheat crops. In crop rotation was used corn, soybeans or beans in the spring-summer season and black oat or wheat in the autumn-winter season. Soybean was sown in November 2007 (cv. CD 214 RR), 2009 (cv. CD 206 RR), 2010 (cv. BMX Apolo RR), 2012 (cv. NA 5909 RG), and 2013 (cv. BMX Ativa RR). Soil samples were collected annually before soybean sowing at the 0–0.05, 0.05–0.10, and 0.10–0.20 m depths. Surface liming increased pH and the contents of exchangeable Ca²⁺ and Mg²⁺, and reduced the content of exchangeable Al³⁺ to a depth of 0.20 m. Nitrogen fertilization reduced pH and the contents of exchangeable Ca²⁺ and Mg²⁺, especially to a depth of 0.10 m, and increased the content of exchangeable Al³⁺ to a depth of 0.20 m. Surface application of lime increased the soybean grain yields for all N-NH₄NO₃ rates used in black oat or wheat crops. In unlimed plots, acidification caused by nitrogen fertilization severely limited the soybean grain yield. The critical levels of pH in CaCl₂, base saturation, exchangeable Al³⁺, and Al³⁺ saturation in the 0–0.20 m layer for soybean production were 4.9, 33%, 8.0 mmol_c dm⁻³, and 30%, respectively. Surface application of lime proved to be a key practice to ensure high soybean yields when high ammoniacal fertilizer rates are applied frequently in no-till systems.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill, dolomitic lime, nitrogen, soil acidity, relative production, critical levels.

LISTA DE FIGURAS

	Página
<p>FIGURA 1 - Dados climáticos de Ponta Grossa, PR. Precipitação pluvial mensal e médias históricas da região durante o período de desenvolvimento da cultura da soja (smaABC, 2012; DERAL, 2015; IAPAR, 2015).....</p>	27
<p>FIGURA 2 - Valores de pH em CaCl₂ para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície, após 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) da aplicação. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de N e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem nitrogênio (◆), com 60 kg ha⁻¹ de N (■), com 120 kg ha⁻¹ de N (▲) e com 180 kg ha⁻¹ de N (●). **: <i>P</i> < 0,01.....</p>	31
<p>FIGURA 3 - Valores de pH em CaCl₂ para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio aplicadas anualmente em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo), aos 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) após a calagem. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de calcário e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem calcário (◆), com 4 t ha⁻¹ de calcário (■), com 8 t ha⁻¹ de calcário (▲) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (●). **: <i>P</i> < 0,01 e *: <i>P</i> < 0,05.....</p>	32
<p>FIGURA 4 - Teores de Al³⁺ trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície, após 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) da aplicação. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de N e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem nitrogênio (◆), com 60 kg ha⁻¹ de N (■), com 120 kg ha⁻¹ de N (▲) e com 180 kg ha⁻¹ de N (●). **: <i>P</i> < 0,01.....</p>	33
<p>FIGURA 5 - Teores de Al³⁺ trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio aplicadas anualmente em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo), aos 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) após a calagem. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de calcário e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem calcário (◆), com 4 t ha⁻¹ de calcário (■), com 8 t ha⁻¹ de calcário (▲) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (●). **: <i>P</i> < 0,01 e *: <i>P</i> < 0,05.....</p>	34

- FIGURA 6 -** Teores de Ca^{2+} trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície, após 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) da aplicação. Na ausência de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de quatro doses de N e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem nitrogênio (\blacklozenge), com 60 kg ha⁻¹ de N (\blacksquare), com 120 kg ha⁻¹ de N (\blacktriangle) e com 180 kg ha⁻¹ de N (\bullet). **: $P < 0,01$ 35
- FIGURA 7 -** Teores de Ca^{2+} trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio aplicadas anualmente em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo), aos 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) após a calagem. Na ausência de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de quatro doses de calcário e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem calcário (\blacklozenge), com 4 t ha⁻¹ de calcário (\blacksquare), com 8 t ha⁻¹ de calcário (\blacktriangle) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (\bullet). **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$ 36
- FIGURA 8 -** Teores de Mg^{2+} trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície, após 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) da aplicação. Na ausência de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de quatro doses de N e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem nitrogênio (\blacklozenge), com 60 kg ha⁻¹ de N (\blacksquare), com 120 kg ha⁻¹ de N (\blacktriangle) e com 180 kg ha⁻¹ de N (\bullet). **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$ 37
- FIGURA 9 -** Teores de Mg^{2+} trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio aplicadas anualmente em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo), aos 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) após a calagem. Na ausência de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de quatro doses de calcário e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem calcário (\blacklozenge), com 4 t ha⁻¹ de calcário (\blacksquare), com 8 t ha⁻¹ de calcário (\blacktriangle) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (\bullet). **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$ 38
- FIGURA 10 -** Produtividade de grãos de soja em 2007–2008, cv. CD 214 RR (a), 2009–2010, cv. CD 206 RR (b), 2010–2011, cv. BMX Apolo RR (c), 2012–2013, cv. NA 5909 RG (d) e 2013–2014, cv. BMX Ativa RR (e), considerando as doses de calcário na superfície (I) sem nitrogênio (\blacklozenge), com 60 kg ha⁻¹ de N (\blacksquare), com 120 kg ha⁻¹ de N (\blacktriangle) e com 180 kg ha⁻¹ de N (\bullet); e (II) considerando as doses de nitrogênio aplicadas em

cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo) nas parcelas sem calcário (◆), com 4 t ha⁻¹ de calcário (■), com 8 t ha⁻¹ de calcário (▲) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (●). Os pontos são médias de três repetições. **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$ 41

FIGURA 11 - Relações entre a produção relativa (PR) de soja e o pH em CaCl₂ (a) e a saturação por bases do solo (b), nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. ●: PR de soja, cv. CD 214 RR, em 2007–2008; ○: PR de soja, cv. CD 206 RR, em 2009–2010; ■: PR de soja, cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011; □: PR de soja, cv. NA 5909 RG, em 2012–2013; ◆: PR de soja, cv. BMX Ativa RR, em 2013–2014. **: $P < 0,01$ 45

FIGURA 12 - Relações entre a produção relativa (PR) de soja e o teor de Al³⁺ trocável (a) e a saturação por Al³⁺ (b), nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. ●: PR de soja, cv. CD 214 RR, em 2007–2008; ○: PR de soja, cv. CD 206 RR, em 2009–2010; ■: PR de soja, cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011; □: PR de soja, cv. NA 5909 RG, em 2012–2013; ◆: PR de soja, cv. BMX Ativa RR, em 2013–2014. **: $P < 0,01$ 47

FIGURA 13 - Relações entre a produção relativa (PR) de soja e os teores de Ca²⁺ trocável (a) e Mg²⁺ trocável (b), nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. ●: PR de soja, cv. CD 214 RR, em 2007–2008; ○: PR de soja, cv. CD 206 RR, em 2009–2010; ■: PR de soja, cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011; □: PR de soja, cv. NA 5909 RG, em 2012–2013; ◆: PR de soja, cv. BMX Ativa RR, em 2013–2014. **: $P < 0,01$ 49

FIGURA 14 - Relações entre a produção relativa (PR) de soja e a saturação por Ca²⁺ na CTC a pH 7,0 (a) e a saturação por Mg²⁺ na CTC a pH 7,0 (b), nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. ●: PR de soja, cv. CD 214 RR, em 2007–2008; ○: PR de soja, cv. CD 206 RR, em 2009–2010; ■: PR de soja, cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011; □: PR de soja, cv. NA 5909 RG, em 2012–2013; ◆: PR de soja, cv. BMX Ativa RR, em 2013–2014. **: $P < 0,01$ 51

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 - Análises químicas e granulométricas do solo antes da instalação do experimento.....	25

SUMÁRIO

	Página
1	INTRODUÇÃO..... 14
2	REVISÃO DE LITERATURA..... 16
2.1	ACIDEZ DO SOLO E SISTEMA PLANTIO DIRETO..... 16
2.2	CALAGEM NO SISTEMA PLANTIO DIRETO..... 17
2.3	ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA ANTECESSORA À CULTURA PRINCIPAL..... 18
2.4	RESPOSTA DA CULTURA DA SOJA À CALAGEM..... 19
2.5	PRODUÇÃO RELATIVA DE SOJA <i>versus</i> ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO..... 20
3	MATERIAL E MÉTODOS..... 25
3.1	LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO..... 25
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO..... 25
3.3	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL..... 25
3.4	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA..... 26
3.5	AMOSTRAGEM E ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO 27
3.6	CULTURA DA SOJA..... 28
3.7	PRODUTIVIDADE E PRODUÇÃO RELATIVA DE GRÃOS DE SOJA..... 28
3.8	ANÁLISES ESTATÍSTICAS..... 29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 30
4.1	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO..... 30
4.2	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA..... 40

4.3	PRODUÇÃO RELATIVA DE SOJA <i>versus</i> ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	44
5	CONCLUSÕES	52
6	REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

A produção agrícola no Brasil tem sido afetada pela acidez e erosão do solo. Os maiores problemas gerados pela acidez do solo estão relacionados com a deficiência de cálcio (Ca) e/ou a toxicidade de alumínio (Al) e manganês (Mn). Nessas condições, há restrição no crescimento radicular, dificultando a absorção de água e nutrientes pelas plantas, e acarretando em perdas na produtividade (SOUSA et al., 2007).

O sistema plantio direto teve início no Estado do Paraná a partir da década de 1970, visando minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão. Nesse sistema, a correção da acidez do solo é feita por meio da aplicação de calcário na superfície sem incorporação. A calagem na superfície apresenta mobilidade limitada no solo, diminuindo a sua eficiência na redução da acidez em subsuperfície (PAVAN et al., 1984). Porém, há trabalhos realizados no Paraná que demonstraram eficiência da aplicação superficial de calcário na correção da acidez de camadas subsuperficiais em sistema plantio direto (OLIVEIRA & PAVAN, 1996; CAIRES et al., 2000a).

Nos sistemas agrícolas produtivos é comum o uso de fertilizantes amoniacais como fontes de nitrogênio (N). Quando aplicados em solos calcariados, grande parte do NH_4^+ adicionado é convertido em NO_3^- . A acidez gerada pelo processo de nitrificação auxilia a dissolução do calcário, resultando na lixiviação de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e outros sais formados para o subsolo. Como a absorção de NO_3^- pelas raízes normalmente é maior do que a de Ca^{2+} , pode ocorrer aumento do pH no subsolo.

A calagem superficial também pode ter ação na correção da acidez do solo abaixo do local da aplicação por meio (i) da formação e migração de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ para camadas mais profundas do solo, (ii) do deslocamento vertical de partículas finas de calcário e

(iii) da complexação de metais (Ca^{2+} e Mg^{2+}) com ânions orgânicos produzidos no processo de mineralização dos resíduos orgânicos.

Na agricultura, as recomendações de calagem e adubação para as culturas são geralmente efetuadas com base nas doses de corretivos e fertilizantes que assegurem 90% de produção relativa, a qual é usualmente considerada a produção de máxima eficiência econômica (nível crítico) (EMBRAPA, 2011).

Os mecanismos de ação da aplicação de calcário na superfície em plantio direto ainda geram dúvidas a respeito dos critérios mais adequados para a recomendação de calagem nesse sistema. Tais dúvidas devem ser esclarecidas por meio da realização de estudos de longa duração envolvendo a calagem superficial em plantio direto.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as alterações químicas do solo, a produtividade e os níveis críticos para o desenvolvimento da cultura da soja em função da aplicação superficial de calcário e da adubação nitrogenada em sistema plantio direto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ACIDEZ DO SOLO E SISTEMA PLANTIO DIRETO

A grande maioria dos solos brasileiros, notadamente aqueles envolvidos na expansão da fronteira agrícola, apresenta características de acidez, as quais estão, em geral, associadas com a presença de Al e Mn em concentrações tóxicas, e de baixos teores de cátions básicos (SOUSA et al., 2007).

Os solos podem ser naturalmente ácidos em consequência da pobreza do material de origem em cátions básicos ou por condições de pedogênese que favoreçam a remoção de cátions básicos do solo (RAIJ, 2011). Além da origem naturalmente ácida, os solos podem apresentar ainda contínua acidificação por meio da dissociação do gás carbônico ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$) – reação limitada a valores de pH em água maiores que 5,2 – e da adição de fertilizantes nitrogenados amoniacais (QUAGGIO, 1986; RAIJ, 1991; SHARMA et al., 2011). A adubação nitrogenada é considerada preponderante no processo de acidificação do solo porque, durante a oxidação do NH_4^+ a NO_3^- , realizada por microrganismos nitrificantes, ocorre a liberação de H^+ , que passa a ocupar as posições de troca dos cátions trocáveis lixiviados pelo NO_3^- (RAIJ, 1991).

Para atenuar os efeitos negativos da acidificação do solo na produtividade das culturas é imprescindível realizar a correção da acidez por meio da prática da calagem que é a maneira mais simples para atingir esse objetivo. Aliada à calagem, o sistema plantio direto passou a ser visto como uma importante prática de conservação do solo por minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão (MUZILLI, 1981; LOPES et al., 2004).

O sistema plantio direto com rotação diversificada de culturas apresenta ainda outros benefícios, pois contribui para a manutenção/melhoria da qualidade do solo, em função da economia de nutrientes, do aumento do conteúdo de matéria orgânica, da melhoria da capacidade de retenção de água, da conservação dos micro-organismos e da manutenção da

temperatura do solo (MARQUES et al., 2010). Porém, para a sustentabilidade desse sistema, algumas práticas de manejo como a calagem são muito importantes e merecem maior atenção.

2.2 CALAGEM NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

A calagem é considerada uma das práticas que mais contribui para o aumento da eficiência dos fertilizantes e, conseqüentemente, da produtividade e da rentabilidade agrícola. Os materiais corretivos da acidez mais empregados na agricultura são rochas calcárias moídas, as quais possuem carbonatos de cálcio (CaCO_3) e de magnésio (MgCO_3) em sua composição. Também são utilizados como corretivos da acidez do solo os óxidos, hidróxidos e silicatos, capazes de neutralizar a acidez do meio (ALCARDE et al., 1992). Assim, a correção do perfil do solo e a utilização de corretivos que apresentam maior eficiência na melhoria das condições de acidez no subsolo permite maior exploração radicular, uma vez que o impedimento químico do solo é eliminado ou reduzido (CORRÊA et al., 2008).

No sistema plantio direto, o calcário é aplicado na superfície sem incorporação. Devido à sua baixa solubilidade, a ação do calcário restringe-se às zonas de aplicação ou imediatamente abaixo delas (PAVAN et al., 1984; ERNANI et al., 2001; ALLEONI et al., 2005). Entretanto, existem trabalhos realizados em sistema convencional de preparo do solo (QUAGGIO et al., 1982; 1985) e em sistema plantio direto (OLIVEIRA & PAVAN, 1996; CAIRES et al., 1999; 2000a; 2002; AMARAL et al., 2004) que demonstraram efeitos positivos da calagem na melhoria das condições de acidez no subsolo.

Diversos mecanismos têm sido sugeridos para explicar os efeitos da calagem superficial na correção da acidez em subsuperfície no sistema plantio direto: (i) movimentação de Ca^{2+} e Mg^{2+} ao longo do perfil do solo por meio da formação de pares iônicos com NO_3^- e SO_4^{2-} (FOLONI & ROSOLEM, 2006; LOPES et al., 2007) e com ligantes orgânicos produzidos no processo de mineralização dos resíduos vegetais (CAIRES et al.,

1998); (ii) formação e migração de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ para as camadas mais profundas do solo (OLIVEIRA & PAVAN, 1996); e (iii) deslocamento vertical de partículas de calcário, preferencialmente de partículas mais finas, pelo movimento descendente da água através de canais e espaços existentes no solo (AMARAL et al., 2004). Considerando a complexidade dos mecanismos envolvidos, ainda não existe clareza de qual mecanismo estaria ocasionando maior contribuição na melhoria das condições de acidez abaixo do local de aplicação com a calagem na superfície. Para isso, tais efeitos precisam ser mais bem investigados na tentativa de elucidar o mecanismo preponderante na correção da acidez subsuperficial com a aplicação de calcário na superfície em sistema plantio direto.

2.3 ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA ANTECESSORA À CULTURA PRINCIPAL

O aumento na produtividade das culturas tem ocasionado necessidade de aumentar a eficiência do uso de fertilizantes. Um dos aspectos mais importantes para se alcançar sucesso no sistema plantio direto é a formação de uma contínua cobertura vegetal (viva ou morta) sobre o solo que seja capaz de minimizar o processo erosivo, que leve à maior retenção de água no solo e que promova maior disponibilidade de nutrientes. Segundo Oliveira et al. (2002), essas metas são atingidas mediante a adoção de uma rotação de culturas que não siga apenas uma alternância aleatória de espécies, mas de uma sequência racional de culturas.

A ausência do revolvimento do solo e a manutenção de resíduos culturais na superfície resultam em aumento significativo na quantidade de matéria orgânica do solo (SÁ et al., 2001), implicando em maior estoque de N total no solo (LOVATO et al., 2004). O N potencialmente mineralizável ocorre em maior quantidade na camada superficial do solo e a taxa de liberação é lenta (SOUZA & MELO, 2000), o que também é desejável para o maior sincronismo entre a taxa de liberação de N e a taxa de absorção pelas plantas.

A acidez do solo inibe a produção de NO_3^- , sendo a nitrificação favorecida pela calagem (ROSOLEM et al., 2003). O NO_3^- é o ânion mais abundante nos solos e, por ter carga negativa é repellido pela superfície eletronegativa das partículas do solo, permanecendo na solução de modo suscetível à lixiviação (RAIJ, 1991).

Uma importante estratégia para melhorar a disponibilidade de N para a cultura seguinte é a fertilização antecipada de N, por exemplo, na cultura de aveia, no início de seu perfilhamento, com o objetivo de aumentar a produção de biomassa e melhorar a qualidade dos resíduos, ocasionando redução na relação C/N e aumento na ciclagem de nutrientes (SANTI et al., 2003).

Durante a decomposição da palhada, parte dos nutrientes ligados ao carbono, como o N e o S, é assimilada pelos organismos decompositores e parte é mineralizada e liberada como NO_3^- e SO_4^{2-} , respectivamente, como subprodutos desse processo. Portanto, a decomposição constitui processo fundamental em sistemas agrícolas, garantindo a ciclagem de nutrientes e favorecendo o aumento na biodiversidade do sistema (RICE, 2005).

2.4 RESPOSTA DA CULTURA DA SOJA À CALAGEM

O rápido desenvolvimento do cultivo da soja no Brasil, a partir da década de 1960, fez surgir um novo e agressivo setor produtivo, altamente demandante por tecnologias que a pesquisa ainda não estava estruturada para oferecer. Uma delas era a prática da calagem.

O calcário é um recurso abundante no país e apresenta baixo custo relativo se comparado com os demais fertilizantes utilizados na agricultura moderna. A calagem serve de fonte de Ca e Mg para as plantas, sendo comum a ocorrência de aumento nos teores de Ca e Mg nas folhas (CAIRES et al., 1999; 2001) e nos grãos (BARTH, 2005) das culturas com a aplicação de calcário dolomítico.

A soja é uma espécie considerada muito exigente em termos nutricionais e, dependendo do cultivar, pode ser bastante sensível às condições de acidez do solo. A acidez do solo limita o crescimento do sistema radicular e, conseqüentemente, a absorção de água e nutrientes, acarretando em perdas na produtividade da cultura da soja (LIMA et al., 2003).

A cultura da soja responde bem à calagem, como pode ser visto nos trabalhos de Rajj et al. (1977), Mascarenhas et al. (1969; 1981) e Quaggio et al. (1982), os quais mostraram aumentos consideráveis na produção de soja devidos à aplicação de calcário. Respostas positivas da soja à calagem também podem ser vistas em trabalhos mais recentes (FAGERIA, 2001a; MIRANDA et al., 2005). Porém, em outros trabalhos realizados em solos com elevada acidez no sistema plantio direto foram observadas altas produtividades de soja e ausência de resposta da cultura à calagem superficial (CAIRES et al., 2003; 2006).

Esse comportamento da soja cultivada em sistema plantio direto pode estar associado ao acúmulo de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo que, por sua vez, pode diminuir a toxicidade do Al por meio de sua complexação com ligantes orgânicos (MIYAZAWA et al., 1993). Além disso, a adição de Ca, Mg e K no solo por meio da mineralização dos resíduos vegetais também pode contribuir para diminuir a atividade do Al em solução (FRANCHINI et al., 1999; CIOTTA et al., 2002; DIEHL et al., 2008). Deve-se considerar ainda que a maior umidade que ocorre nas camadas superficiais do solo em sistema plantio direto, em função da cobertura vegetal que reduz perdas de água por evaporação, pode garantir adequada absorção de nutrientes pelas plantas, mesmo em condições de alta acidez (CAIRES & DA FONSECA, 2000b).

2.5 PRODUÇÃO RELATIVA DE SOJA *versus* ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

A análise química do solo, certamente, é a principal ferramenta para o diagnóstico da fertilidade do solo e o estabelecimento da necessidade de correção e adubação das culturas

(FAQUIN, 2002). Os tecidos das plantas, por sua vez, mostram por meio da diagnose foliar, o estado nutricional que as plantas se encontram, tendo em vista que a folha recém madura é o órgão que geralmente responde mais às variações no suprimento do nutriente, seja pelo solo, seja pelo fertilizante (MALAVOLTA et al., 1997).

Na agricultura, as recomendações de calagem e adubação para as culturas são geralmente efetuadas com base nas doses de corretivos e fertilizantes que assegurem 90% de produção relativa, a qual é usualmente considerada a produção de máxima eficiência econômica (nível crítico) (EMBRAPA, 2011).

Em solos com concentrações de nutrientes menores do que o teor crítico, a taxa de crescimento ou a produção vegetal diminui significativamente, demonstrando a necessidade de adubação complementar. Quando o teor de determinado nutriente for superior ao nível crítico, há pouca probabilidade de resposta produtiva da planta ao fornecimento desse nutriente, obtendo-se a produção de máxima eficiência econômica (PEREIRA & GOMES, 1998; ISMAEL, 1998; FAQUIN, 2002).

Nicolodi et al. (2008) avaliaram em 20 locais na região produtora de grãos do Estado do Rio Grande do Sul, a relação entre o rendimento relativo de grãos de soja e os atributos indicadores de acidez do solo, coletados nas camadas de 0–0,10 e 0–0,20 m. Em todos os locais das lavouras avaliadas, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico. Nesse estudo, os autores observaram que não ocorreu aumento no rendimento de grãos em solos com pH em água maior que 5,3 e com pH em CaCl_2 maior que 5,0. Por essa interpretação, o rendimento relativo de grãos na faixa entre 65 e 100% deve ter sido afetado por outros fatores e não pelo pH do solo. O rendimento de grãos também não foi limitado pela saturação por bases, quando esta foi maior do que 60%, avaliada na camada de 0–0,20 m. Resultados semelhantes foram encontrados por Vieira et al. (2013).

Miranda & Miranda (2000) realizaram um estudo em um solo Glei Pouco Húmico argiloso, com doses iniciais de 0, 2, 4, 6 e 8 t ha⁻¹ de calcário dolomítico aplicado a lanço. Neste estudo, amostras de solo foram coletadas na camada de 0–0,20 m e observou-se que a máxima produtividade relativa, para a média de quatro cultivos de milho e três cultivos de soja em sucessão, foi obtida com a saturação por bases do solo de 42% para o milho e 38% para a soja.

A produção de grãos também pode ser limitada pela presença de Al no solo. De modo geral, o Al não deve ser tóxico para concentrações menores que 5 mmol_c dm⁻³ de Al³⁺ trocável, é tóxico para concentrações entre 5 e 10 mmol_c dm⁻³ de Al³⁺ trocável, e altamente tóxico para concentrações acima de 10 mmol_c dm⁻³ de Al³⁺ trocável; porém, as espécies e os cultivares dentro da mesma espécie podem mostrar tolerância muito diferente à toxidez por Al (MALAVOLTA, 1980).

Caires et al. (2008) estimaram que o nível crítico de Al³⁺ trocável no solo para o crescimento radicular do trigo foi de 3 mmol_c dm⁻³. Porém, os autores relataram que as plantas de trigo passaram por períodos de estiagem na fase vegetativa, de forma que a toxicidade do Al para as plantas deve ter se manifestado de forma mais intensa na presença de menor umidade disponível do solo. Em situações desfavoráveis de umidade no solo, a fitotoxicidade de Al³⁺ ocasionada pela acidez do solo no sistema plantio direto é intensificada e compromete seriamente o crescimento radicular de plantas com pouca tolerância ao Al (JORIS et al., 2013).

O nível crítico de Al também pode ser influenciado pelo manejo do solo. No sistema plantio direto, aproximadamente 2/3 do Al solúvel encontra-se na forma orgânica, enquanto que no sistema convencional apenas metade está nessa forma. Outra diferença importante entre os sistemas é o percentual das espécies Al³⁺ e AlOH²⁺ consideradas tóxicas para as plantas. Salet et al. (1999) verificaram, na solução do solo, a presença de 2,5% de Al³⁺ e 1,6%

de AlOH^{2+} em sistema plantio direto, e de 4,0% de Al^{3+} e 2,6% AlOH^{2+} em sistema convencional de preparo.

Outra forma de avaliar a toxicidade do Al para as plantas, especialmente em solos tropicais, é por meio da saturação por Al. Para Kamprath (1967 apud LOPES, 1994) e Muzilli et al. (1978), a produção da maioria das plantas sensíveis ao Al^{3+} é diminuída em solos com mais de 20% de saturação por Al.

Smyth & Cravo (1992) avaliaram a eficiência da utilização de calcário e gesso nas culturas de milho, soja, amendoim e caupi para corrigir os problemas de deficiência de Ca e de excesso de Al em um Latossolo da Amazônia e observaram que, para as culturas de milho e soja, a saturação por Al^{3+} no solo não deveria ser superior a 27%, enquanto, para o amendoim, o nível crítico foi de 54%.

Em outro estudo realizado por Lima et al. (2003), utilizando dois solos ácidos de Cerrado, um Latossolo Vermelho-Amarelo (argiloso) e um Neossolo Quartzarênico (arenoso), verificou-se que, em ambos os solos, houve efeito significativo da saturação por Al^{3+} sobre a produção de massa seca de soja. O efeito foi maior no solo arenoso, sendo a produção de massa seca de soja diminuída (redução >10%) significativamente a partir da saturação por Al^{3+} de 12%. O solo argiloso apresentou comportamento diferente, tendo-se verificado efeito bem menos drástico do Al. Tomando-se como limiar a produção relativa de 90% da massa seca, verificou-se que esse patamar foi mantido até a saturação por Al^{3+} de 31,5%.

Kamprath (1971) sugeriu que a eliminação dos níveis tóxicos de Al e Mn, e a adição de quantidades adequadas de Ca e Mg, por meio da calagem, é uma das práticas mais comuns e efetivas para aumentar a produção agrícola em solos ácidos. De acordo com o estudo realizado por Fageria (2001b), o nível adequado de Ca^{2+} trocável no solo foi de $19 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o arroz, $29 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o feijão, $33 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o milho e $40 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para

a soja. O nível adequado de Mg^{2+} trocável no solo foi de $12 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a cultura de arroz e de $14 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para as culturas de feijão, milho e soja.

A interação entre Ca, Mg e K tem sido tema de estudos para definir as relações ideais no solo ou saturações da capacidade de troca catiônica (CTC), nas quais as suas proporções sejam adequadas para suprir a demanda das plantas. A adição de calcário no solo, além de corrigir a acidez, aporta consideráveis quantidades de Ca^{2+} e Mg^{2+} e, dependendo da proporção existente entre esses cátions no corretivo, pode resultar em alterações em suas proporções na CTC. O problema em alterar a proporção entre Ca^{2+} e Mg^{2+} é que o excesso de um parece induzir a deficiência do outro, podendo até diminuir a produtividade das culturas (MIOTTO, 2009).

Para Fageria (2001b) os níveis adequados de saturação por Ca^{2+} e por Mg^{2+} na CTC a pH 7,0 do solo, para a cultura da soja, foram de 51% e 18%, respectivamente. Em outro estudo, as bases trocáveis do solo, nas porcentagens de 55% de Ca^{2+} , 15% de Mg^{2+} e 5% de K^+ conferiram maior equilíbrio nutricional para a cultura da soja (GASPAR, 2010).

De acordo com Bear & Toth citados por Oliveira et al. (2001) e Albrecht citado por Astera (2014), para o balanço ideal de cátions no complexo de troca, o solo deveria estar ocupado por 65% de Ca^{2+} , 10-15% de Mg^{2+} e 4-5% de K^+ na CTC a pH 7,0.

Os dados levantados na literatura apontam divergências nos níveis críticos de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no solo para a cultura da soja. Além disso, o equilíbrio de cátions na CTC a pH 7,0 do solo para o adequado desenvolvimento da soja é um assunto polêmico que merece ser mais bem investigado.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado no período de maio de 2004 a maio de 2014 no município de Ponta Grossa – PR, na Fazenda Estância dos Pinheiros (25° 10' S, 50° 05' W), com altitude de 970 m e precipitação pluvial anual média de 1.550 mm.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico textura média. Antes da instalação do experimento, o solo estava sendo cultivado sob plantio direto há 26 anos. Os resultados de análises químicas (PAVAN et al., 1992) e granulométricas do solo (EMBRAPA, 1997), realizadas antes da instalação do experimento, são mostrados na Tabela 1. O solo apresentava alta acidez, teores tóxicos de Al trocável e baixos teores de Ca e Mg trocáveis em todo o perfil (0–0,60 m).

Tabela 1. Análises químicas e granulométricas do solo antes da instalação do experimento.

Profun- didade	pH (CaCl ₂)	H+Al	Al	Ca	Mg	K	P ¹	C	V ²	Areia	Silte	Argila
m			mmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³	g dm ⁻³	%		g kg ⁻¹	
0-0,20	4,1	110	12	5	5	1,7	6,0	18	10	465	240	295
0,20-0,40	4,2	105	10	4	3	1,3	1,9	15	7	-	-	-
0,40-0,60	4,3	94	7	5	2	1,0	0,8	13	8	-	-	-

¹P extraído com solução de Mehlich-1. ²V = Saturação por bases.

3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com três repetições. As áreas de cada parcela e subparcela foram de 166,4 e 41,6 m², respectivamente. Nas parcelas, aplicaram-se quatro doses de calcário dolomítico: 0,

4, 8 e 12 t ha⁻¹. O calcário utilizado continha 310 g kg⁻¹ de CaO, 230 g kg⁻¹ de MgO e 85% de poder relativo de neutralização total (PRNT). O calcário foi aplicado a lanço na superfície em maio de 2004. As doses de calcário empregadas foram calculadas visando elevar a saturação por bases do solo, na camada de 0–0,20 m, a aproximadamente 40, 65 e 90%. Nas subparcelas, aplicaram-se anualmente quatro doses de N: 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹, na forma de nitrato de amônio (32% de N: 16% N-NO₃⁻ e 16% N-NH₄⁺), em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo). O total de N-NH₄NO₃ aplicado ao final dos dez anos de acompanhamento do experimento foi de 600, 1200 e 1800 kg ha⁻¹, respectivamente, em cada subparcela. As doses de N-NH₄NO₃ foram aplicadas a lanço, no início do perfilhamento das culturas de aveia preta ou trigo. Na rotação de culturas, foram utilizados: aveia preta (2004), milho (2004–2005), aveia preta (2005), soja (2005–2006), aveia preta (2006), soja (2006–2007), aveia preta (2007), soja (2007–2008), aveia preta (2008), milho (2008–2009), trigo (2009), soja (2009–2010), trigo (2010), soja (2010–2011), aveia preta (2011), feijão (2011–2012), feijão (2012), trigo (2012), soja (2012–2013), aveia preta (2013) e soja (2013–2014). No presente estudo, a cultura da soja foi avaliada nos cultivos realizados em 2007–2008, 2009–2010, 2010–2011, 2012–2013 e 2013–2014.

3.4 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA

A precipitação pluvial durante a realização do experimento é mostrada na Figura 2. A precipitação pluvial total ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento da soja no campo foi de 922 mm em 2007–2008, 998 mm em 2009–2010, 716 mm em 2010–2011, 957 mm em 2012–2013 e 697 mm em 2013–2014.

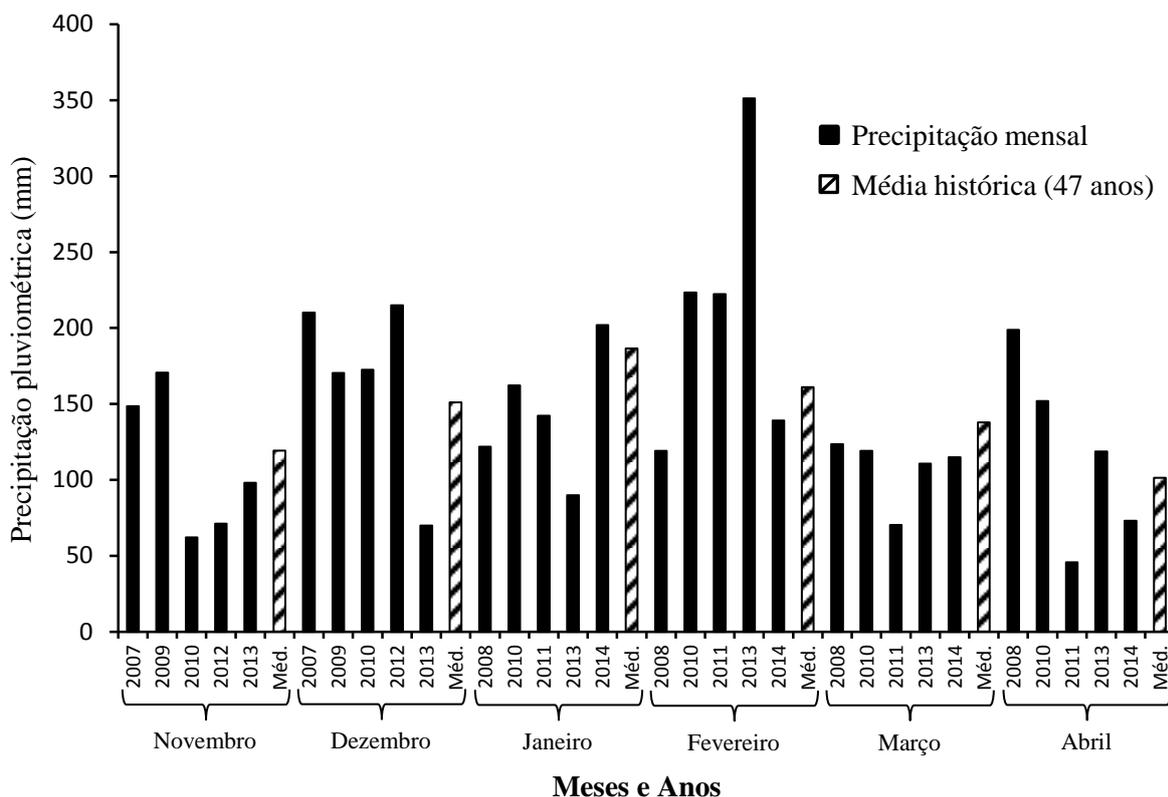


Figura 1. Dados climáticos de Ponta Grossa, PR. Precipitação pluvial mensal e médias históricas da região (47 anos) durante o período de desenvolvimento da cultura da soja (smaABC, 2012; DERAL, 2015; IAPAR, 2015).

3.5 AMOSTRAGEM E ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

Amostras de solo foram coletadas até a profundidade de 0,20 m, antes da semeadura da soja em 2007, 2009, 2010, 2012 e 2013, correspondendo a 3, 5, 6, 8 e 9 anos após a calagem. Foram retiradas, por meio de trado calador, 12 subamostras por subparcela para constituir uma amostra composta das camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m. As amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 40°C. Determinaram-se o pH em solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , a acidez potencial (H + Al) e os teores de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis, de acordo com os métodos descritos em Pavan et al. (1992). Para avaliar a influência das doses de calcário e $\text{N-NH}_4\text{NO}_3$ nos atributos químicos do solo, foram consideradas apenas as amostras coletadas após 3, 6 e 9 anos após a calagem.

3.6 CULTURA DA SOJA

A semeadura da soja (*Glycine max* L. Merrill), nos cinco cultivos avaliados (2007–2008, 2009–2010, 2010–2011, 2012–2013 e 2013–2014), foi realizada em novembro, na densidade de 15 sementes por metro (inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*) e espaçamento de 0,45 m entre as linhas. Os cultivares de soja utilizados foram: CD 214 RR (tolerante ao complexo de acidez do solo) em 2007–2008, CD 206 RR (moderadamente tolerante ao complexo de acidez do solo) em 2009–2010, BMX Apollo RR (com alta exigência em fertilidade do solo) em 2010–2011, NA 5909 RG (com alta exigência em fertilidade do solo) em 2012–2013 e BMX Ativa RR (com alta exigência em fertilidade do solo) em 2013–2014. A adubação utilizada na semeadura da soja foi de 300 kg ha⁻¹ da fórmula 02–28–20 (N–P₂O₅–K₂O) em 2007, 250 kg ha⁻¹ da fórmula 02-20-10 (N–P₂O₅–K₂O) em 2009, 300 kg ha⁻¹ da fórmula 02–20–20 (N–P₂O₅–K₂O) em 2010. Em 2012 e 2013, a adubação da soja foi realizada de forma antecipada na cultura do inverno (trigo e aveia preta, respectivamente), empregando-se 190 kg ha⁻¹ da fórmula 12–32–00 (N–P₂O₅–K₂O), com a adubação potássica sendo realizada em cobertura, após a semeadura da soja, na dose de 120 kg ha⁻¹ em 2012 e 90 kg ha⁻¹ em 2013, na forma de KCl.

3.7 PRODUTIVIDADE E PRODUÇÃO RELATIVA DE GRÃOS DE SOJA

A soja cultivada em 2007–2008, 2009–2010, 2010–2011, 2012–2013 e 2013–2014 foi colhida e trilhada, sendo a produtividade de grãos determinada a 130 g kg⁻¹ de umidade. A avaliação de produtividade de grãos foi realizada por meio de colheita manual e trilhagem em máquina debulhadora estacionária em uma área útil de 6,0 m² de cada subparcela. A produção relativa de grãos de soja foi calculada tomando-se o rendimento máximo de grãos obtido em cada subparcela como referencial de 100%, dentro de cada ano de cultivo.

3.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises de variância foram realizadas seguindo o modelo em parcelas subdivididas. Na ausência de interação significativa entre as doses de calcário e de N, foram ajustadas equações de regressão aos dados obtidos em função dos tratamentos, utilizando-se as médias das observações. Na presença de interação significativa entre os tratamentos de calagem e de N, realizou-se o desdobramento da interação, ajustando-se equações de regressão aos dados de doses de calcário dentro de cada dose de N e àqueles referentes às doses de N dentro de cada dose de calcário. Equações de regressão também foram ajustadas aos dados de produção relativa de soja em função dos atributos químicos do solo relacionados com a acidez, nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. Utilizou-se como critério para a escolha do modelo a magnitude dos coeficientes de determinação, considerando-se as regressões significativas ao nível de 5%. As análises estatísticas foram executadas por meio dos programas de computador SISVAR, conforme método descrito por Ferreira (2006), e SAEG, de acordo com Ribeiro Júnior (2001).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

A aplicação de calcário na superfície após 3, 6 e 9 anos proporcionou aumento no pH em todas as profundidades estudadas (Figura 2). Na avaliação após 9 anos da aplicação de calcário, houve interação significativa entre doses de calcário e de N na camada superficial do solo (0–0,05 m). Nesse caso, as doses de calcário aumentaram o pH do solo na camada de 0–0,05 m, porém os valores de pH alcançados foram mais baixos à medida que mais N foi adicionado na adubação. Aumentos mais acentuados no pH do solo ocorreram na camada superficial do solo nas três épocas de amostragem, mostrando que houve um gradiente de correção da acidez no perfil, a partir da superfície do solo.

As doses de N-NH₄NO₃ aplicadas anualmente nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo) ocasionaram decréscimos no pH do solo, principalmente até a profundidade de 0,10 m, decorrente da acidificação gerada pela adubação nitrogenada (Figura 3). Na avaliação após 9 anos da aplicação de calcário, o desdobramento da interação entre doses de calcário e de N, na camada superficial do solo (0–0,05 m), revelou maior redução no pH do solo nas parcelas que apresentavam acidez mais baixa decorrente das doses mais elevadas de calcário aplicadas na superfície. Tal efeito deve ter ocorrido em função do poder tampão do solo na medida em que a acidificação pela adubação nitrogenada se tornou mais acentuada.

Os teores de Al³⁺ trocável no solo foram influenciados significativamente pela interação entre doses de calcário e de N nas três épocas de amostragem (Figuras 4 e 5). Somente após 9 anos da aplicação de calcário, na camada de 0,10–0,20 m, a interação de calcário × N não foi significativa. As doses de calcário aplicadas na superfície diminuíram o teor de Al³⁺ trocável até a profundidade de 0,20 m para todas as doses de N-NH₄NO₃, aos 3, 6 e 9 anos após a calagem (Figura 4).

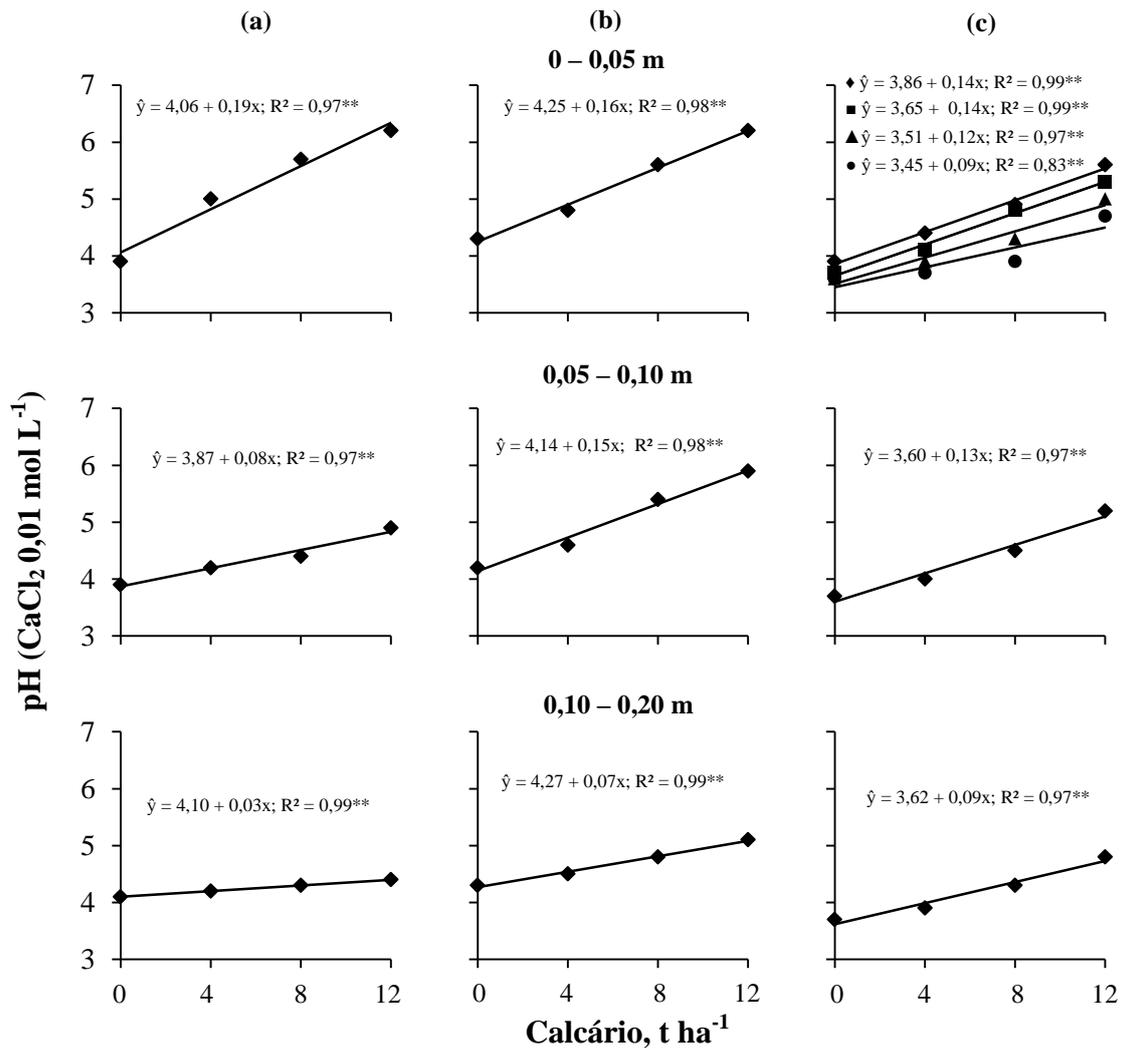


Figura 2. Valores de pH em CaCl₂ para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície, após 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) da aplicação. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de N e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem nitrogênio (◆), com 60 kg ha⁻¹ de N (■), com 120 kg ha⁻¹ de N (▲) e com 180 kg ha⁻¹ de N (●). **: $P < 0,01$.

A redução no teor de Al³⁺ trocável com a calagem (Figura 4) é ocasionada pela precipitação do Al com a sua hidrólise. Nota-se que depois de um longo período da calagem (9 anos), as doses mais altas de calcário (8 e 12 t ha⁻¹) foram suficientes para insolubilizar todo o Al³⁺ trocável presente nas camadas superficiais do solo (0–0,05 e 0,05–0,10 m) e mantiveram os teores de Al³⁺ em níveis baixos na camada de 0,10–0,20 m, mesmo quando as doses mais elevadas de N-NH₄NO₃ foram aplicadas.

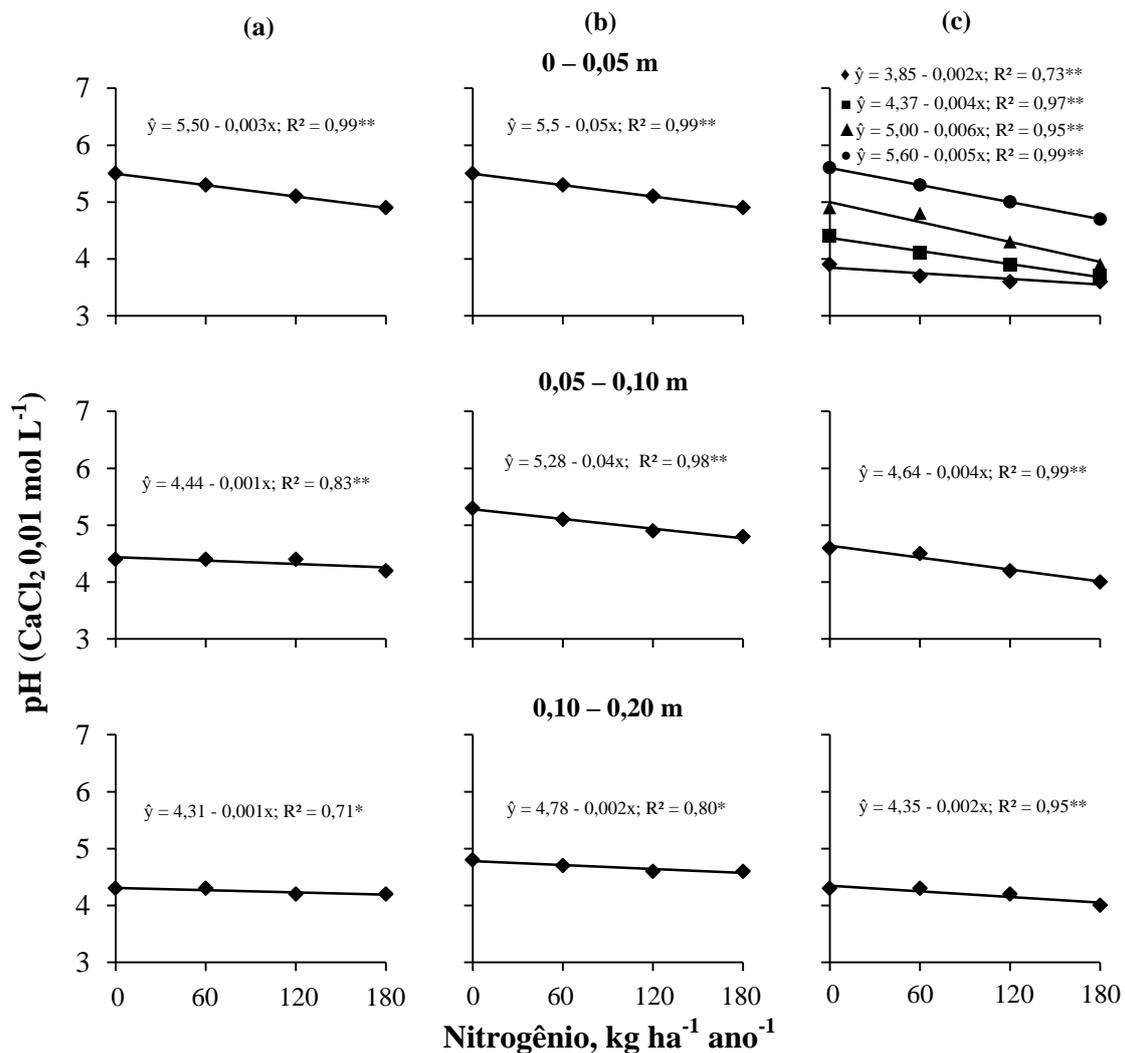


Figura 3. Valores de pH em CaCl₂ para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio aplicadas anualmente em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo), aos 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) após a calagem. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de calcário e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem calcário (♦), com 4 t ha⁻¹ de calcário (■), com 8 t ha⁻¹ de calcário (▲) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (●). **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$.

As doses de N-NH₄NO₃ aplicadas anualmente nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo) aumentaram o teor de Al³⁺ trocável em todas as profundidades estudadas (Figura 5), especialmente nas parcelas sem calagem e com a menor dose de calcário (4 t ha⁻¹). Na presença da maior dose de calcário (12 t ha⁻¹), observa-se que os teores de Al³⁺ trocáveis foram baixos ou não detectados em todas as camadas estudadas, inclusive quando as maiores doses de N-NH₄NO₃ foram aplicadas.

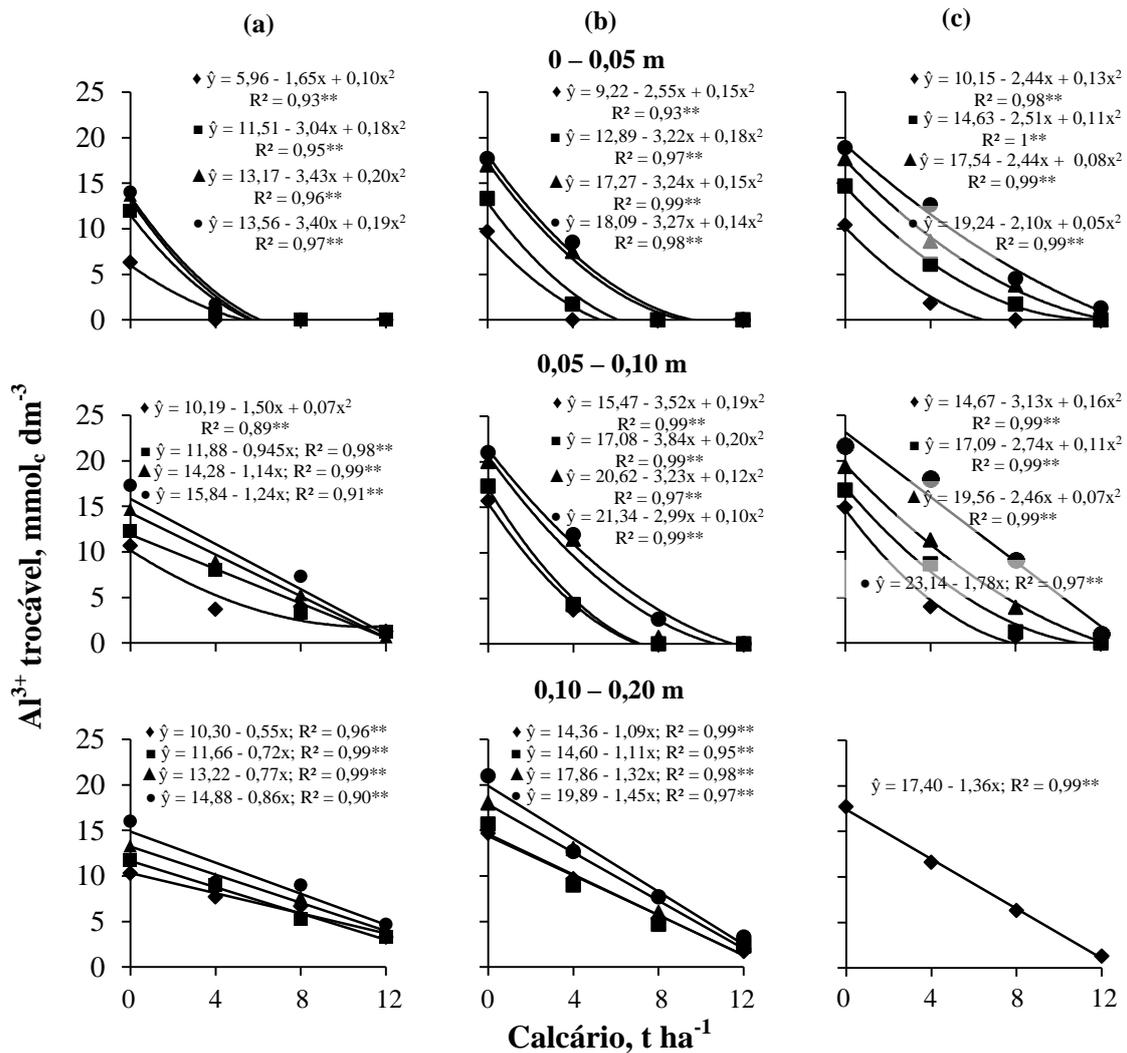


Figura 4. Teores de Al³⁺ trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície, após 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) da aplicação. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de N e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem nitrogênio (◆), com 60 kg ha⁻¹ de N (■), com 120 kg ha⁻¹ de N (▲) e com 180 kg ha⁻¹ de N (●). **: $P < 0,01$.

Efeitos semelhantes aos encontrados no presente estudo em relação ao pH e ao Al³⁺ trocável também foram observados por Araújo et al. (2009) em dois solos distintos, Latossolo Vermelho (argiloso) e Neossolo Quartzarênico (arenoso), sendo que a calagem aumentou linearmente o pH dos solos em quatro ciclos de cultivo, tanto para o solo argiloso quanto para o arenoso. O aumento no pH do solo com a calagem resultou em redução linear nos teores de Al³⁺ trocável em ambos os solos, devido à precipitação do Al³⁺ na forma de Al(OH)₃ (DELHAIZE & RYAN, 1995).

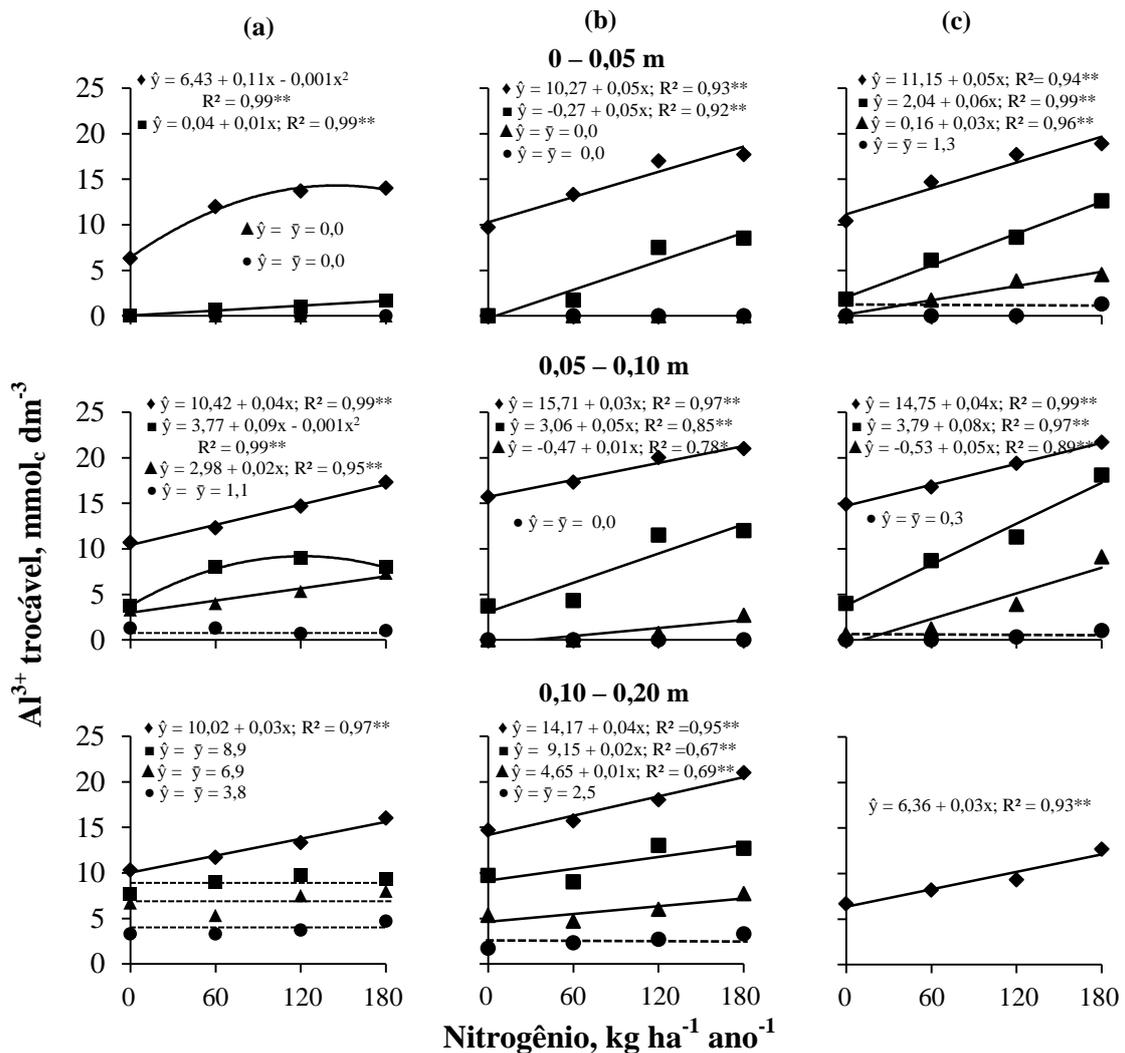


Figura 5. Teores de Al³⁺ trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio aplicadas anualmente em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo), aos 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) após a calagem. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de calcário e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem calcário (◆), com 4 t ha⁻¹ de calcário (■), com 8 t ha⁻¹ de calcário (▲) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (●). **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$.

As doses de calcário aplicadas na superfície aumentaram os teores de Ca²⁺ trocável nas três profundidades estudadas e nas três épocas de amostragem (Figura 6), mostrando que houve mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície para as camadas mais profundas do solo. Na camada superficial (0–0,05 m), após 3, 6 e 9 anos, e também nas camadas de 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m, após 9 anos, houve interação significativa

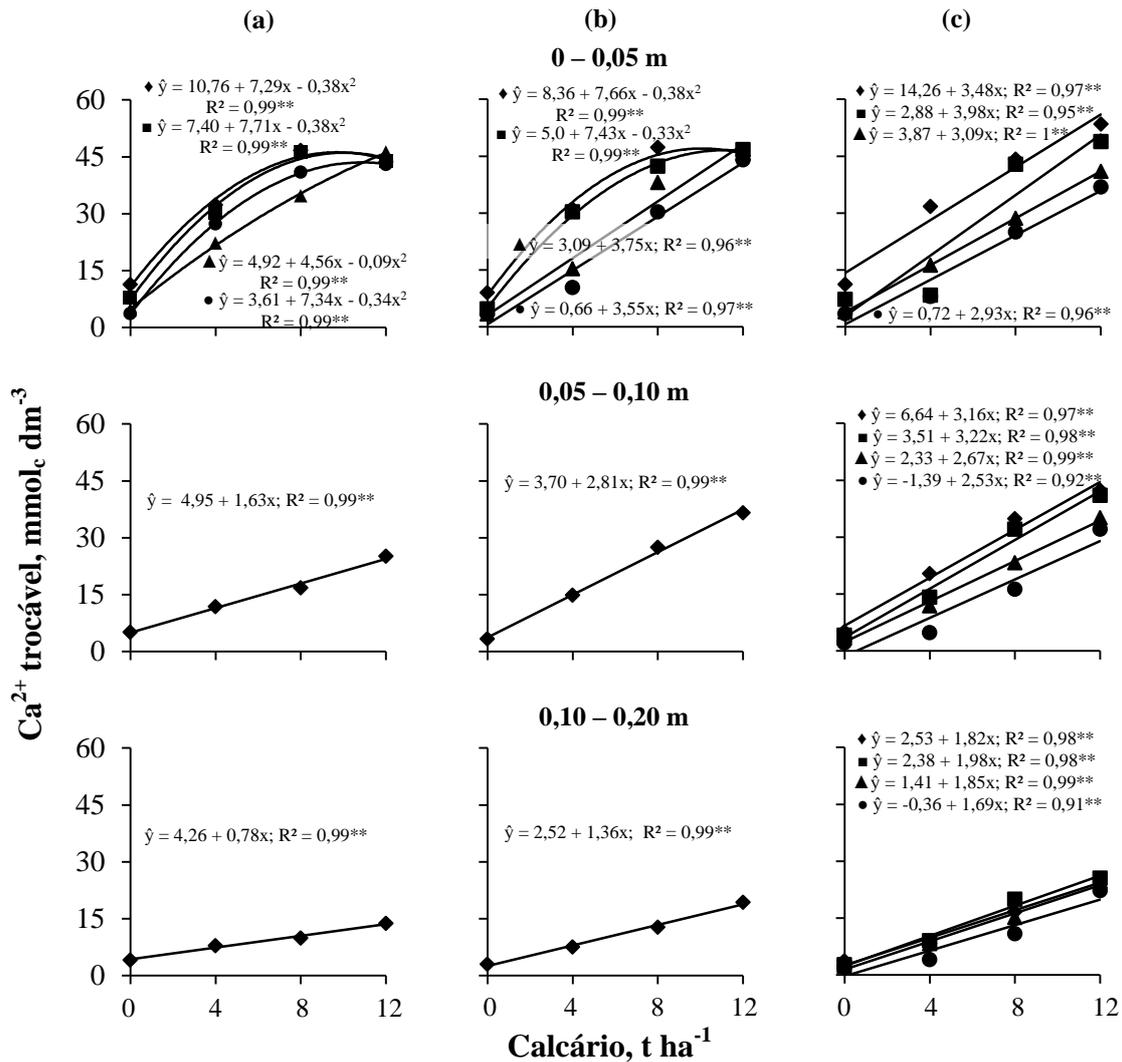


Figura 6. Teores de Ca²⁺ trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície, após 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) da aplicação. Na ausência de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de quatro doses de N e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário × N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem nitrogênio (♦), com 60 kg ha⁻¹ de N (■), com 120 kg ha⁻¹ de N (▲) e com 180 kg ha⁻¹ de N (●). **: $P < 0,01$.

entre doses de calcário e de N, tendo-se observado aumento significativo nos teores de Ca²⁺ trocável para todas as doses de N-NH₄NO₃ aplicadas (Figura 6).

As doses de N-NH₄NO₃ aplicadas anualmente nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo) reduziram os teores de Ca²⁺ trocável (Figura 7), especialmente na camada superficial do solo (0–0,05 m), alcançando de forma mais evidente a camada de 0,05–0,10 m após 9 anos da aplicação do calcário. Destaca-se que as parcelas que receberam a maior dose

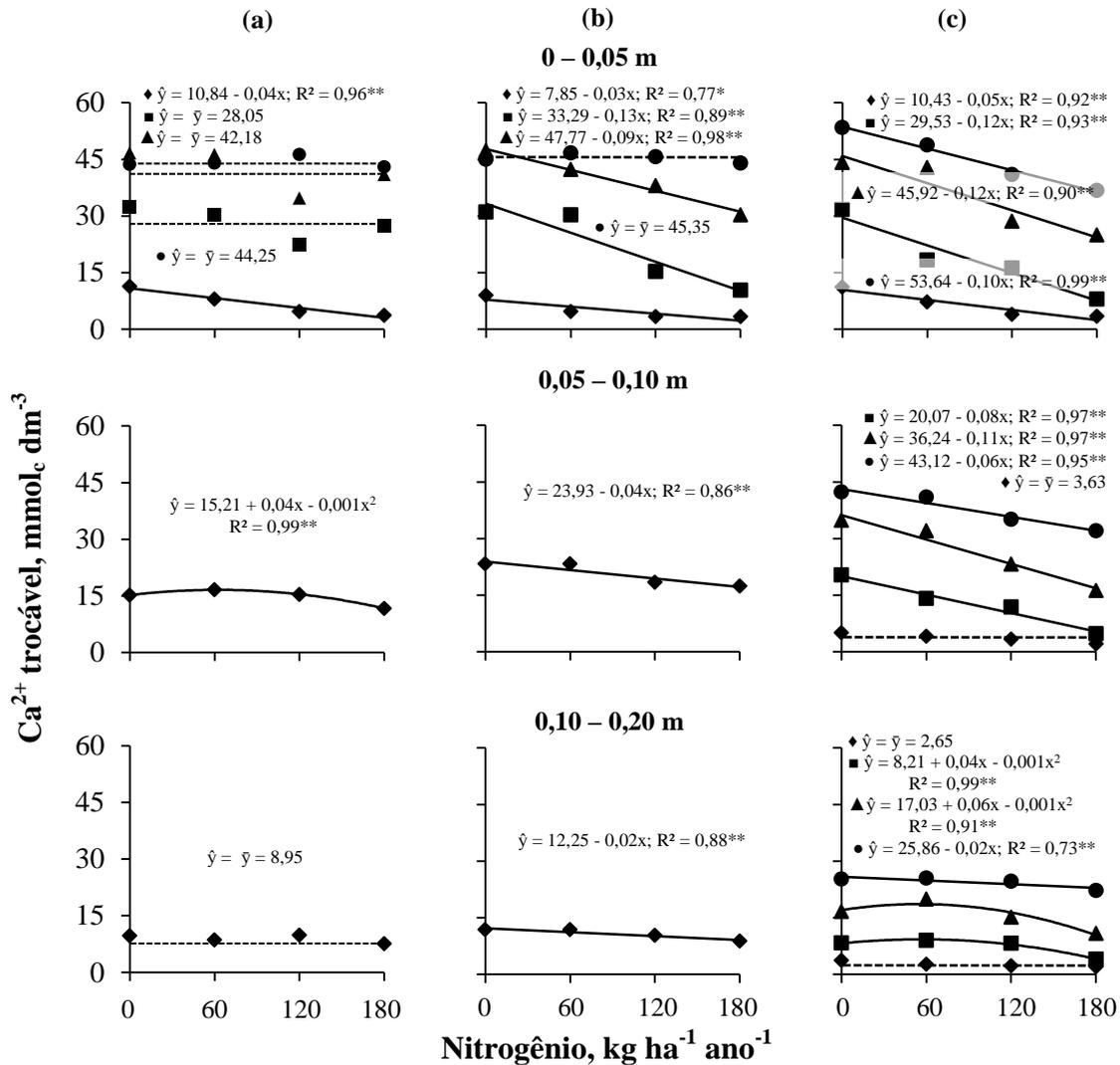


Figura 7. Teores de Ca^{2+} trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio aplicadas anualmente em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo), aos 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) após a calagem. Na ausência de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de quatro doses de calcário e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem calcário (\blacklozenge), com 4 t ha⁻¹ de calcário (\blacksquare), com 8 t ha⁻¹ de calcário (\blacktriangle) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (\bullet). **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$.

de calcário (12 t ha⁻¹) mantiveram, em longo prazo, teores mais elevados de Ca^{2+} trocável até a profundidade de 0,20 m. A redução nos teores de Ca^{2+} da camada superficial do solo foi ocasionada pela movimentação do Ca^{2+} decorrente da formação de par iônico com o NO_3^- , proveniente da adubação nitrogenada (LOPES et al. 2007; FOLONI & ROSOLEM, 2006).

Os teores de Mg^{2+} trocável foram influenciados significativamente pela interação entre doses de calcário e de N até a profundidade de 0,20 m, nas três épocas de amostragem

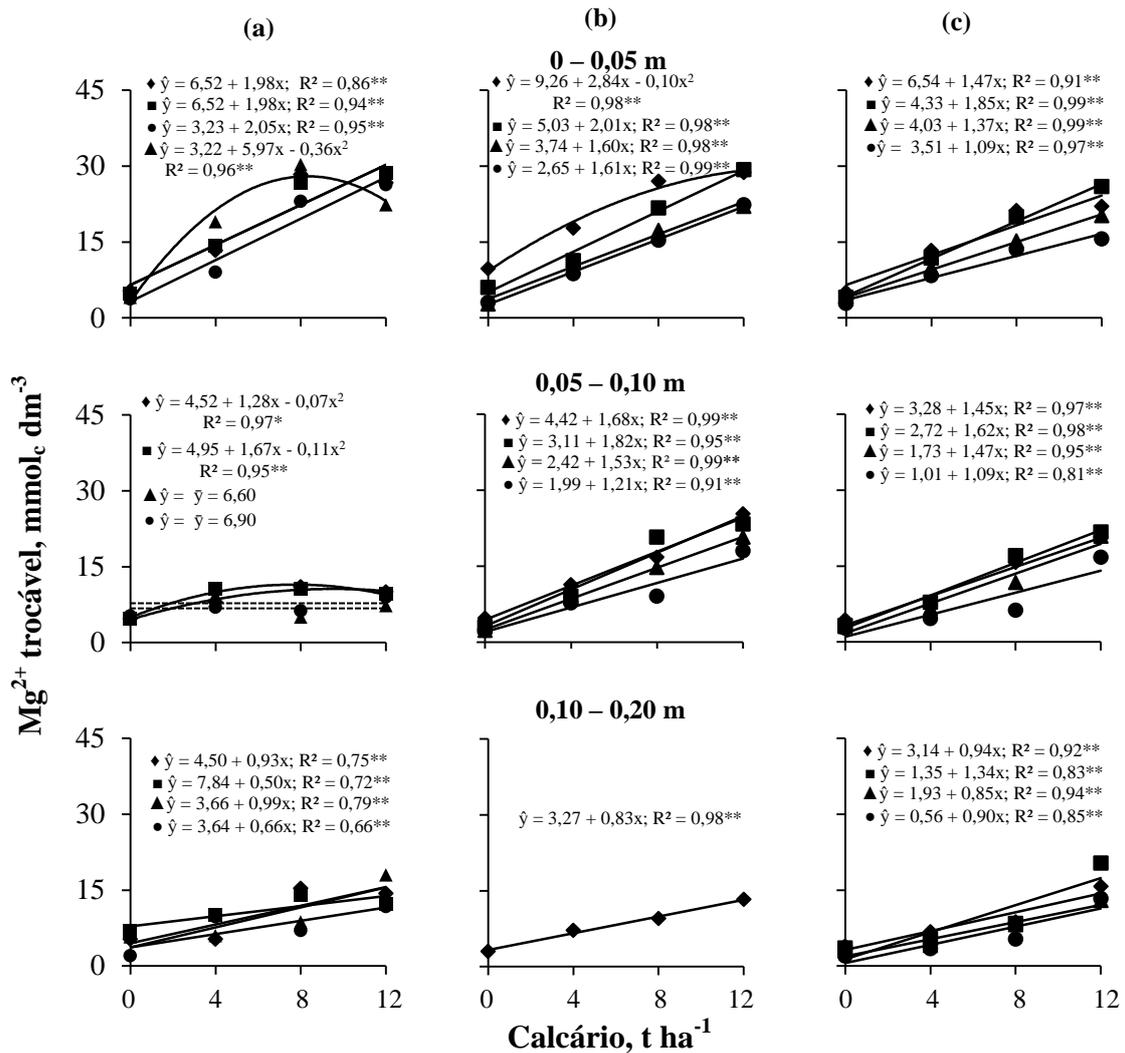


Figura 8. Teores de Mg^{2+} trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície, após 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) da aplicação. Na ausência de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de quatro doses de N e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem nitrogênio (\blacklozenge), com 60 kg ha⁻¹ de N (\blacksquare), com 120 kg ha⁻¹ de N (\blacktriangle) e com 180 kg ha⁻¹ de N (\bullet). **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$.

(Figuras 8 e 9). Os maiores incrementos de Mg^{2+} trocável com a calagem na superfície (Figura 8), bem como as reduções mais acentuadas de Mg^{2+} trocável com a adubação nitrogenada (Figura 9), ocorreram nas camadas superficiais do solo (0–0,05 e 0,05–0,10 m). O incremento nos teores de Mg^{2+} trocável com a calagem foi devido à aplicação de calcário dolomítico, enquanto a redução do Mg^{2+} trocável com a adubação nitrogenada foi ocasionada pela movimentação do Mg^{2+} decorrente da formação de par iônico com o NO_3^- . Esses

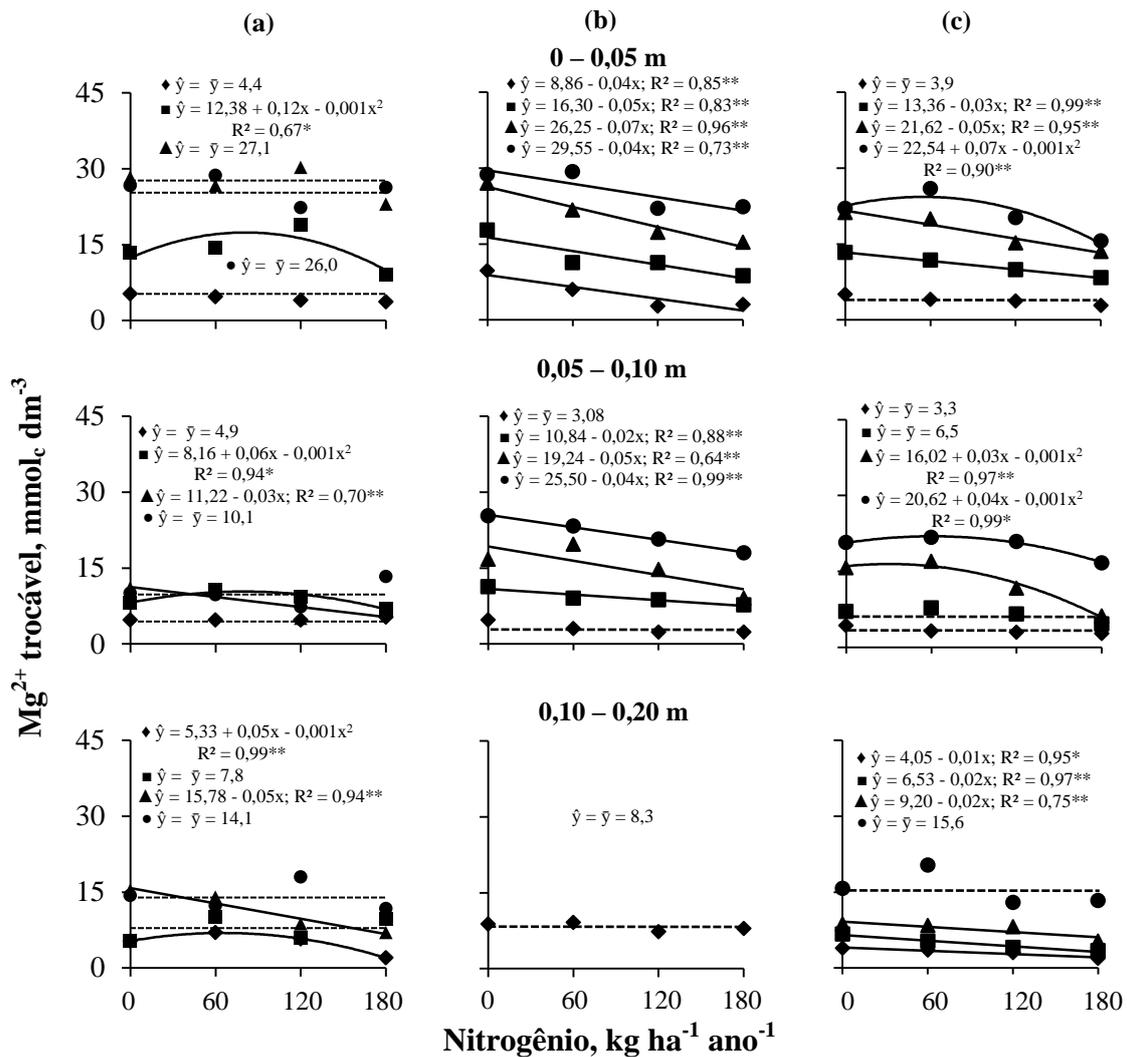


Figura 9. Teores de Mg^{2+} trocável para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio aplicadas anualmente em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo), aos 3 (a), 6 (b) e 9 anos (c) após a calagem. Na ausência de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de quatro doses de calcário e três repetições. No caso de interação significativa entre calcário \times N, os pontos são médias de três repetições para os tratamentos sem calcário (\blacklozenge), com 4 t ha⁻¹ de calcário (\blacksquare), com 8 t ha⁻¹ de calcário (\blacktriangle) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (\bullet). **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$.

resultados estão de acordo com os obtidos por Sarmiento et al. (2008), os quais observaram redução nos teores de Mg^{2+} trocável nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m com o aumento das doses de N aplicadas, utilizando o NH_4NO_3 como fonte de N.

Em condições de boa precipitação pluvial, em solos bem drenados, a lixiviação do NO_3^- é rápida e arrasta equivalentes quantidades de cátions. Caso a absorção do NO_3^- no

subsolo pelas raízes das plantas não seja rápida, o par iônico é perdido para maiores profundidades (LOPES et al., 2007).

A influência da adubação nitrogenada em movimentar bases no solo também foi constatada por Foloni & Rosolem (2006). Trabalhando com doses de sulfato de amônio no algodoeiro e formas de aplicação do calcário (superficial e incorporada), verificou-se que à medida que as concentrações dos ânions SO_4^{2-} e NO_3^- foram aumentadas, houve redução nos teores dos cátions trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas superficiais do solo (0–0,05 e 0,05–0,10 m). Quando o calcário foi incorporado no solo ocorreram correlações significativas entre as concentrações de NO_3^- e SO_4^{2-} e as de Ca^{2+} e Mg^{2+} ao longo de todo o perfil do solo (até 0,50 m de profundidade), com exceção da camada de 0,10–0,20 m para o Ca^{2+} . Esses resultados evidenciaram que a incorporação do corretivo apresentou forte influência sobre a movimentação de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, e concluiu-se que o Mg^{2+} mostrou-se mais susceptível à lixiviação em comparação ao Ca^{2+} . Vale destacar que existem diferenças entre fontes nitrogenadas quanto à sua eficiência em movimentar bases para o subsolo. Rosado et al. (2014) observaram maior influência do sulfato de amônio e do nitrato de cálcio em promover movimentação de bases, especialmente de K^+ , para a profundidade de 0,20–0,40 m, quando comparados com a ureia.

Os resultados obtidos no presente estudo mostraram que após 3, 6 e 9 anos da aplicação superficial de calcário em sistema plantio direto, houve melhoria nos atributos químicos do solo relacionados com a acidez do solo, até a profundidade de 0,20 m. Em diversos trabalhos realizados no sistema plantio direto foram observados efeitos da calagem em camadas abaixo do local de aplicação, mostrando claramente melhoria nas condições de acidez, tanto nas camadas superficiais como nas subsuperficiais do solo (OLIVEIRA & PAVAN, 1996; CAIRES et al., 1998; 1999; 2000a). Destaca-se, entretanto, que apesar da adubação nitrogenada ter ocasionado maior movimentação de Ca^{2+} e Mg^{2+} do calcário

aplicado na superfície para as camadas mais profundas do solo, o aumento no pH do solo até a profundidade de 0,20 m com a calagem na superfície ocorreu de forma independente da aplicação de $N-NH_4NO_3$. Pode-se inferir, portanto, que a adubação com fertilizante nitrogenado amoniacal ocasionou acidificação do solo, mas não aumentou a eficiência da calagem superficial na correção da acidez em sistema plantio direto.

A redução da acidez do solo em camadas abaixo do local de aplicação do calcário em plantio direto, observada no presente estudo, pode ter sido ocasionada por outros fatores, como pela formação e migração de $Ca(HCO_3)_2$ e $Mg(HCO_3)_2$ para camadas mais profundas do solo (OLIVEIRA & PAVAN, 1996) e pelo deslocamento vertical de partículas finas de calcário através do movimento descendente da água por meio de canais e espaços existentes no solo (AMARAL et al., 2004).

4.2 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA

A produtividade de grãos de soja foi influenciada pela interação entre as doses de calcário e de N nos cinco anos avaliados (2007–2008, 2009–2010, 2010–2011, 2012–2013 e 2013–2014) (Figura 10). A produtividade de grãos de soja em 2007–2008 foi aumentada com as doses de calcário aplicadas em 2004, somente nas parcelas que receberam as doses mais elevadas de N (120 e 180 kg ha⁻¹) (Figura 10 – Ia). Já, nos anos 2009–2010 (Figura 10 – Ib), 2010–2011 (Figura 10 – Ic), 2012–2013 (Figura 10 – Id) e 2013–2014 (Figura 10 – Ie), a produtividade de grãos de soja foi aumentada com as doses de calcário aplicadas em 2004 para todas as doses de N utilizadas. Destaca-se, entretanto, que maiores incrementos na produtividade de soja pelas doses de calcário ocorreram na medida em que doses mais elevadas de N foram empregadas nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo).

As doses de $N-NH_4NO_3$ aplicadas nas culturas de outono–inverno nas parcelas sem calcário diminuíram a produtividade de grãos de soja, nos cinco anos avaliados (Figura 10-II).

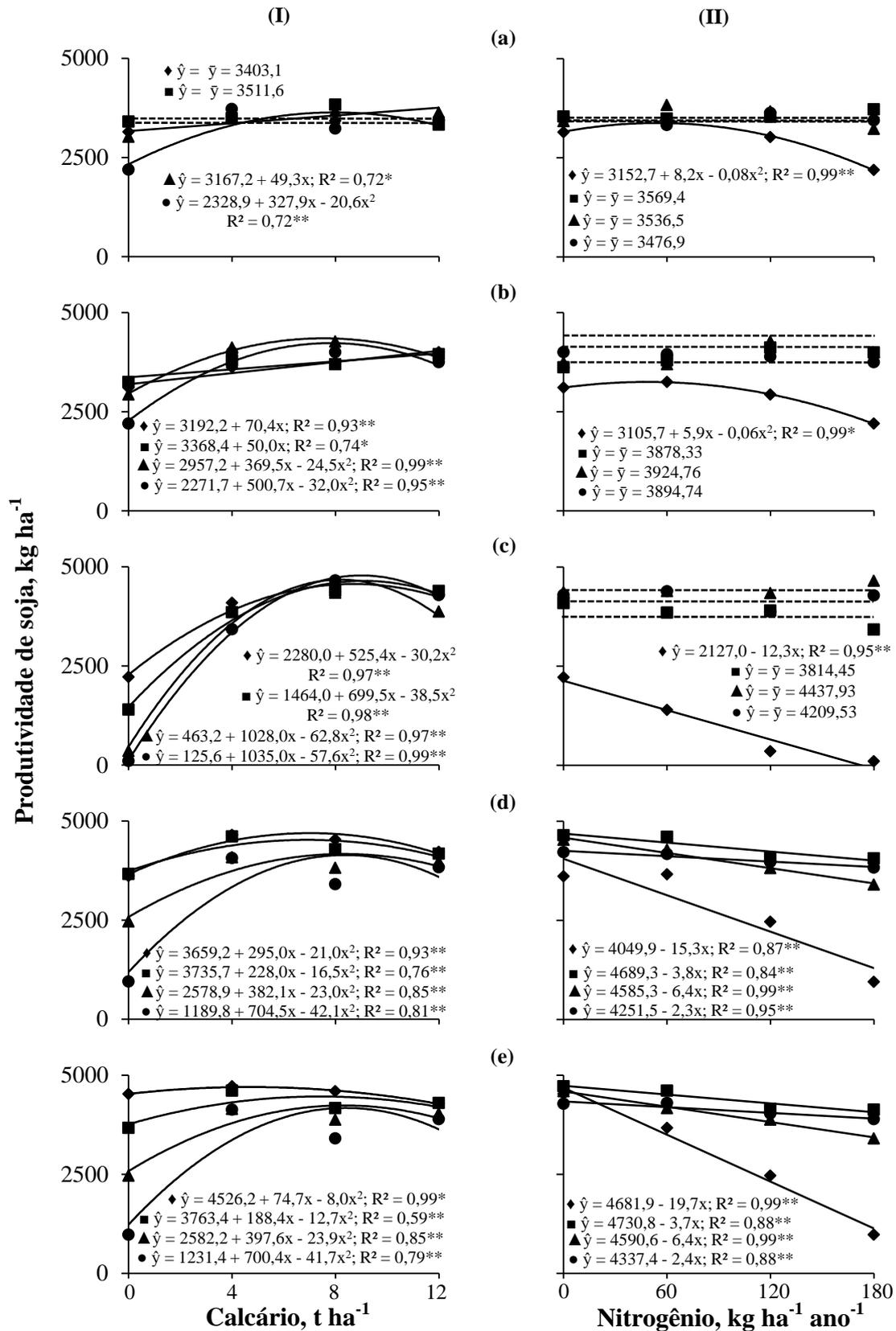


Figura 10. Produtividade de grãos de soja em 2007–2008, cv. CD 214 RR (a), 2009–2010, cv. CD 206 RR (b), 2010–2011, cv. BMX Apolo RR (c), 2012–2013, cv. NA 5909 RG (d) e 2013–2014, cv. BMX Ativa RR (e), considerando as doses de calcário na superfície (I) sem nitrogênio (♦), com 60 kg ha⁻¹ de N (■), com 120 kg ha⁻¹ de N (▲) e com 180 kg ha⁻¹ de N (●); e (II) considerando as doses de nitrogênio aplicadas em cobertura nas culturas de outono–inverno (aveia preta ou trigo) nas parcelas sem calcário (♦), com 4 t ha⁻¹ de calcário (■), com 8 t ha⁻¹ de calcário (▲) e com 12 t ha⁻¹ de calcário (●). Os pontos são médias de três repetições. **: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$.

A redução na produtividade da soja pela adubação nitrogenada nas parcelas sem calcário foi mais drástica em 2010–2011 (Figura 10 – IIc), 2012–2013 (Figura 10 – II d) e 2013–2014 (Figura 10 – IIe). Nas parcelas com calcário, independentemente da dose empregada, a produtividade da soja em 2007–2008 (Figura 10 - IIa), 2009 – 2010 (Figura 10 - IIb) e 2010 – 2011 (Figura 10 - IIc) não foi alterada pela adubação nitrogenada nas culturas de outono–inverno. Em 2012–2013 (Figura 10 - II d) e 2013–2014 (Figura 10 - IIe), houve redução na produtividade da soja com a adubação nitrogenada nas culturas de outono–inverno também nas parcelas que receberam calcário (4, 8 ou 12 t ha⁻¹).

De acordo com as equações de regressão ajustadas, a redução na produtividade de grãos de soja com a maior dose de N-NH₄NO₃ aplicada (180 kg ha⁻¹) nas parcelas sem calcário foi de 950 kg ha⁻¹ em 2007–2008, de 909 kg ha⁻¹ em 2009–2010, de 2118 kg ha⁻¹ em 2010–2011, de 2665 kg ha⁻¹ em 2012–2013 e de 3543 kg ha⁻¹, em 2013–2014 (Figura 10 - II). Essa diminuição no rendimento de grãos de soja com a aplicação de N-NH₄NO₃ na ausência de calagem foi ocasionada pela acidificação do solo provocada pela adubação nitrogenada. A redução mais acentuada na produtividade de soja, em 2010–2011, 2012–2013 e 2013–2014, com a adubação nitrogenada nas parcelas sem calcário, certamente foi consequência da maior acidificação do solo pelas doses de N-NH₄NO₃ acumuladas no sistema. Além disso, a precipitação pluvial ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja no campo foi relativamente mais baixa ou mal distribuída em 2010–2011, 2012–2013 e 2013–2014 (Figura 1). Esses resultados indicam que a acidificação do solo provocada pela adubação nitrogenada pode agravar ainda mais a produtividade da soja em anos com menor disponibilidade hídrica durante o ciclo de desenvolvimento da cultura no campo. Em anos com boa precipitação pluvial, a maior quantidade de água no solo pode favorecer a absorção de nutrientes pelas plantas de soja, mesmo em condições de alta acidez no solo (CAIRES & DA FONSECA, 2000b).

Aumentos consideráveis na produção de grãos de soja devidos à aplicação de calcário têm sido relatados em vários trabalhos realizados em sistema convencional de preparo do solo (MASCARENHAS et al., 1969; RAIJ et al., 1977; MASCARENHAS et al., 1981; QUAGGIO et al., 1982; FAGERIA, 2001a). Em sistema plantio direto, Caires et al. (2001) constataram incremento na produtividade de soja com a aplicação de calcário dolomítico em razão do aumento na absorção de Mg pelas plantas. Porém, altas produtividades de grãos de soja e ausência de resposta da cultura à calagem superficial também têm sido encontradas em solos com elevada acidez no sistema plantio direto (CAIRES et al., 2003; 2006). Nesses casos, a ausência de resposta da soja à calagem tem sido associada com o maior conteúdo de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo que, por sua vez, pode diminuir a toxicidade do Al por meio de sua complexação com ligantes orgânicos.

No presente estudo, os resultados de rendimento de grãos de soja mostraram de forma bastante clara que a matéria orgânica do solo não foi capaz de atenuar a toxicidade do Al para a soja cultivada em plantio direto, quando altas doses de $\text{N-NH}_4\text{NO}_3$ foram aplicadas no sistema. Como a fitotoxicidade do Al é também muito influenciada pelos teores de cátions básicos, é possível que a presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} em níveis altos ou satisfatórios no solo seja tão ou mais importante do que a complexação orgânica do Al na amenização da fitotoxicidade do Al em plantio direto. Isso porque a toxicidade do Al para a soja foi muito mais evidente quando houve perdas de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis proporcionadas pela adubação nitrogenada (Figuras 7 e 9). Destaca-se ainda que a adubação nitrogenada realizada antecipadamente na cultura de outono–inverno não ocasionou nenhum benefício para a produtividade da soja cultivada em subsequência no sistema plantio direto, independentemente da aplicação de calcário.

4.3 PRODUÇÃO RELATIVA DE SOJA *versus* ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Relações significativas foram obtidas entre a produção relativa de soja, nos cultivos realizados em 2007–2008, 2009–2010, 2010–2011, 2012–2013 e 2013–2014, e os atributos químicos do solo relacionados com a acidez (pH em CaCl₂, saturação por bases, Al³⁺ trocável, saturação por Al, Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis, e saturação por Ca e Mg na CTC a pH 7,0) nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m (Figuras 11, 12, 13 e 14).

As relações obtidas entre a produção relativa de soja e o pH em CaCl₂ do solo, nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m, embora tenham sido significativas, foram fracas, considerando que o coeficiente de determinação (R²) variou de 0,24 a 0,26 (Figura 11a). Essas baixas correlações obtidas podem ter sido decorrentes da variabilidade genética dos cultivares quanto à tolerância à acidez, tendo em vista que o cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011, apresentou comportamento diferenciado, demonstrando maior exigência em relação à correção da acidez do solo. Deve-se considerar também que o pH do solo é uma medida instável e pode não ter refletido adequadamente as condições de acidez em que as plantas se desenvolveram durante o ciclo da cultura no campo. Considerando 90% da produção relativa como nível crítico, os valores críticos de pH em CaCl₂ para a produção de soja foram 5,3 na camada de 0–0,05 m, 5,1 na camada de 0–0,10 m e 4,9 na camada de 0–0,20 m (Figura 11a).

Apesar de os genótipos de soja terem apresentado variabilidade quanto à sua tolerância à acidez, e mesmo tendo sido fracas as correlações obtidas, os níveis críticos de pH do solo encontrados no presente estudo foram coerentes com os obtidos em outros trabalhos realizados no sistema plantio direto. Caires et al. (2000a) demonstraram que a calagem superficial em plantio direto não deveria ser realizada em solos com pH em CaCl₂ maior que 5,6 na camada de 0–0,05 m. Nicolodi et al. (2008) observaram que não houve incremento na produtividade de soja em solos com pH em CaCl₂ maior que 5,0 na camada de 0–0,20 m.

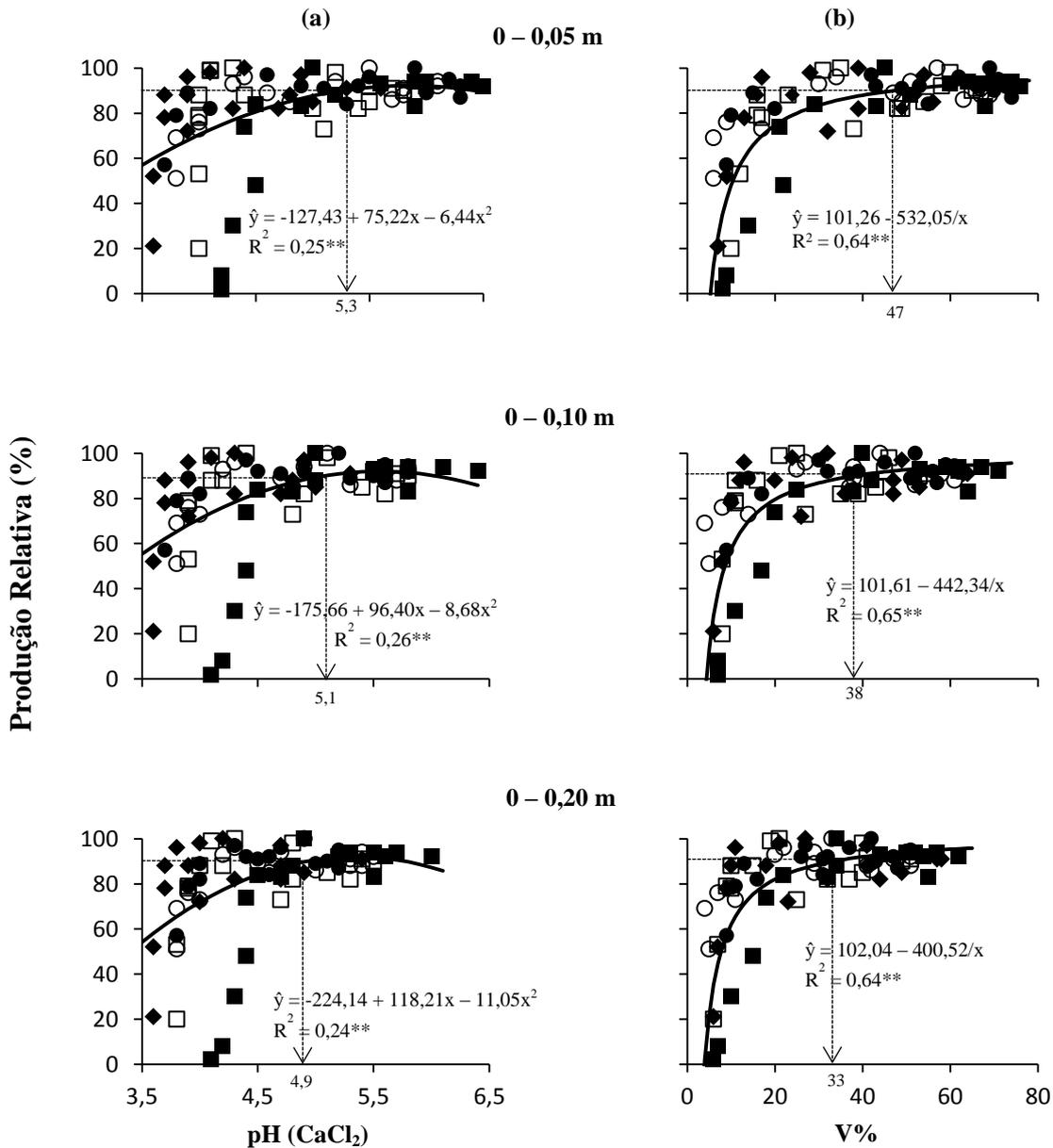


Figura 11. Relações entre a produção relativa (PR) de soja e o pH em CaCl₂ (a) e a saturação por bases do solo (b), nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. ●: PR de soja, cv. CD 214 RR, em 2007–2008; ○: PR de soja, cv. CD 206 RR, em 2009–2010; ■: PR de soja, cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011; □: PR de soja, cv. NA 5909 RG, em 2012–2013; ◆: PR de soja, cv. BMX Ativa RR, em 2013–2014. **: $P < 0,01$.

Tomando como referência as culturas mais restritivas do sistema de rotação e a camada de 0–0,20 m, Vieira et al. (2013) verificaram que o nível crítico de pH em CaCl₂ foi de 4,9, sendo que, nesse estudo, a soja foi a cultura mais sensível à acidez do solo. Pelos resultados obtidos no presente estudo, pode-se inferir que em solo com pH (CaCl₂) maior que

4,9 na camada de 0–0,20 m, a soja apresentaria baixa probabilidade de resposta à elevação do pH.

As relações obtidas entre a produção relativa de soja e a saturação por bases do solo, nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m, foram bem mais estreitas (Figura 11b) do que as encontradas para o pH em CaCl_2 (Figura 11a). A produção relativa de 90% foi atingida com uma saturação por bases de 47% na camada de 0–0,05 m, de 38% na camada de 0–0,10 m e de 33% na camada de 0–0,20 m. Em outro estudo, após três cultivos sucessivos com soja, Miranda & Miranda (2000) observaram que a máxima produção relativa de soja foi obtida com saturação por bases do solo de 38% na camada de 0–0,20 m. Lima et al. (2007) obtiveram produção relativa de soja de 90% quando a saturação por bases foi de 46% em um Latossolo Vermelho-Amarelo de Cerrado. Nicolodi et al. (2008) verificaram que a produtividade de grãos não foi limitada pela saturação por bases, quando esta foi maior do que 60%, na camada de 0–0,20 m. Vieira et al. (2013) obtiveram nível crítico de 60% de saturação por bases na camada de 0–0,20 m para culturas em rotação no sistema plantio direto. Os resultados encontrados no presente estudo indicam que as perdas na produtividade de grãos de soja serão mais pronunciadas para cultivos em solo com saturação por bases inferior a 33% na camada de 0–0,20 m, e que haverá pouca probabilidade de incremento na produtividade de soja com o aumento da saturação por bases para valores acima de 47% na camada de 0–0,05 m. De acordo com Caires et al. (2000a), a calagem superficial para produção de culturas em rotação no sistema plantio direto somente deve ser feita para solo com saturação por bases inferior a 56% na camada superficial do solo (0–0,05 m).

As relações obtidas entre a produção relativa de soja e o teor de Al^{3+} trocável no solo, nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m, mostraram que a produtividade de soja diminuiu com o aumento do teor de Al^{3+} trocável no solo (Figura 12a). A produção relativa de

soja de 90% foi mantida até o teor de Al^{3+} trocável no solo de $3,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 0–0,05 m, sendo que acima desse teor (nível crítico) a produção relativa de soja foi reduzida

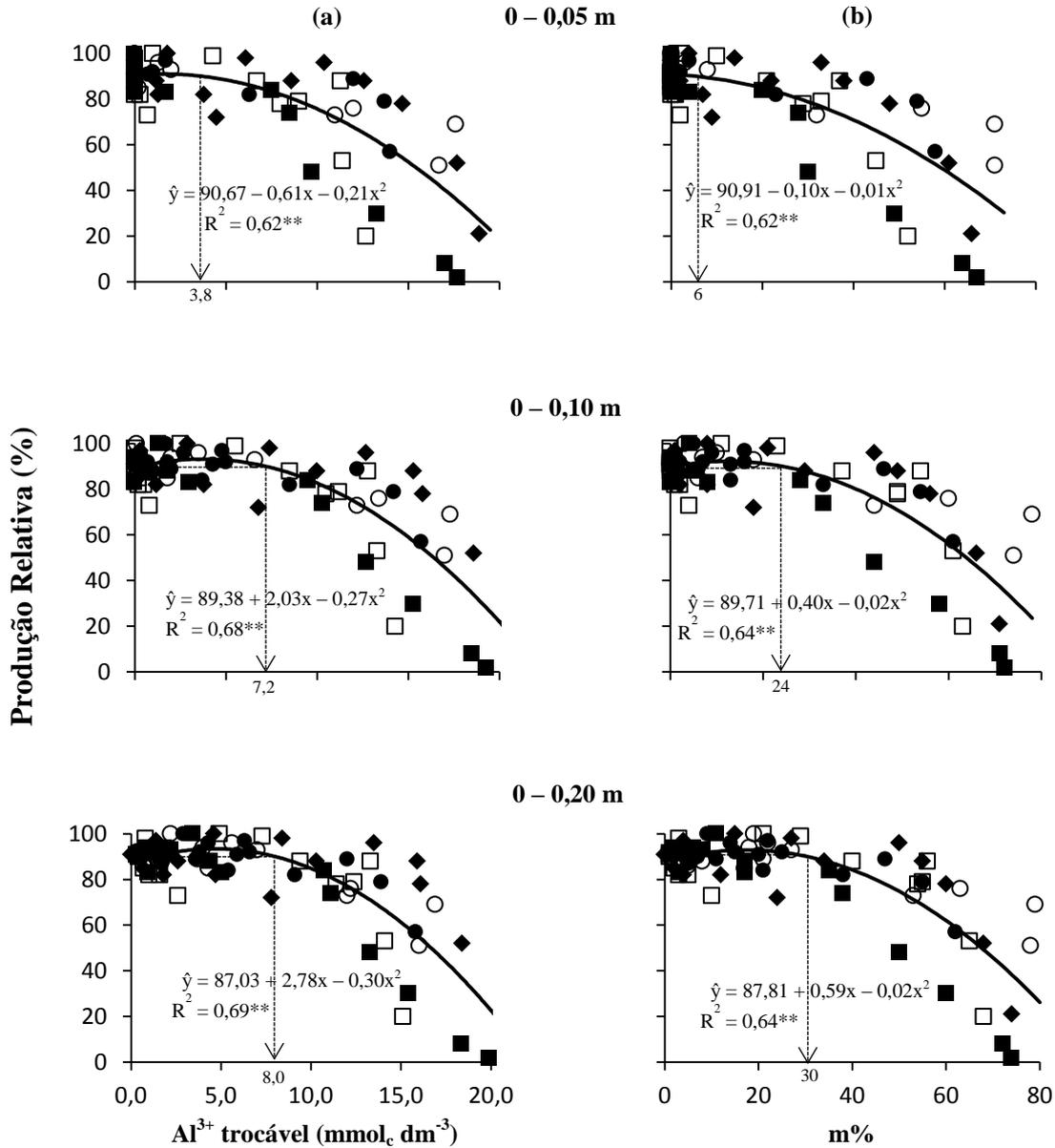


Figura 12. Relações entre a produção relativa (PR) de soja e o teor de Al^{3+} trocável (a) e a saturação por Al^{3+} (b), nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. ●: PR de soja, cv. CD 214 RR, em 2007–2008; ○: PR de soja, cv. CD 206 RR, em 2009–2010; ■: PR de soja, cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011; □: PR de soja, cv. NA 5909 RG, em 2012–2013; ◆: PR de soja, cv. BMX Ativa RR, em 2013–2014. **: $P < 0,01$.

significativamente. Tomando como referência as outras camadas de solo, os níveis críticos de Al^{3+} trocável foram de $7,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,10 m e de $8,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,20 m. Esses resultados concordam com as indicações de Malavolta (1980) de

que o Al^{3+} trocável no solo é tóxico para concentrações entre 5 e 10 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ na camada de 0–0,20 m. No sistema plantio direto, a toxicidade do Al para as plantas tem sido mais baixa porque aproximadamente 2/3 do Al solúvel apresenta-se na forma orgânica, enquanto que no sistema convencional de preparo do solo apenas metade do Al solúvel está nessa forma (SALET et al., 1999). Entretanto, a toxicidade do Al para as plantas em sistema plantio direto pode se manifestar de forma mais intensa quando a umidade disponível no solo é baixa (CAIRES et al., 2008; JORIS et al., 2013). Em condições de severa falta de chuvas durante a fase de desenvolvimento vegetativo da cultura do trigo, o nível crítico de Al^{3+} trocável no solo para o crescimento radicular das plantas foi de apenas 3 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (CAIRES et al., 2008).

A saturação por Al^{3+} também apresentou relações negativas com a produção relativa de soja (Figura 12b). A produção relativa de soja de 90% foi mantida até a saturação por Al^{3+} de 6% na camada de 0–0,05 m. Na camada de 0–0,10 m, a produção relativa de soja foi limitada a partir da saturação por Al^{3+} de 24% e, na camada de 0–0,20 m, a partir de 30%. O nível crítico de saturação por Al^{3+} obtido na camada de 0–0,20 m está de acordo com Kamprath citado por Lopes (1994) e Muzilli et al. (1978). Conforme esses autores, a produção da maioria das culturas sensíveis ao Al é diminuída em solos com mais de 20% de saturação por Al^{3+} . Para Smyth & Cravo (1992), a saturação por Al^{3+} no solo não deve ser superior a 27%. Cabe destacar que o nível crítico de saturação por Al^{3+} pode variar em função do tipo de solo. Lima et al. (2003) verificaram níveis críticos distintos de saturação por Al^{3+} para a produção de massa seca de soja em Latossolo Vermelho-Amarelo (argiloso) e em Neossolo Quartzarênico (arenoso). No solo Neossolo arenoso, houve redução maior que 10% na produção de massa seca de soja a partir de 12% de saturação por Al^{3+} , enquanto que a produção relativa de 90% foi mantida até a saturação por Al^{3+} de 31,5% no Latossolo argiloso.

É interessante destacar que a relação obtida entre a produção relativa de soja e o teor de Al^{3+} trocável (Figura 12a) foi igual à encontrada para a saturação por Al^{3+} , na camada de 0–5 cm (Figura 12b). Já, nas camadas de 0–0,10 e 0–0,20 m, as relações entre a produção relativa de soja e o teor de Al^{3+} trocável foram mais estreitas do que as obtidas para a

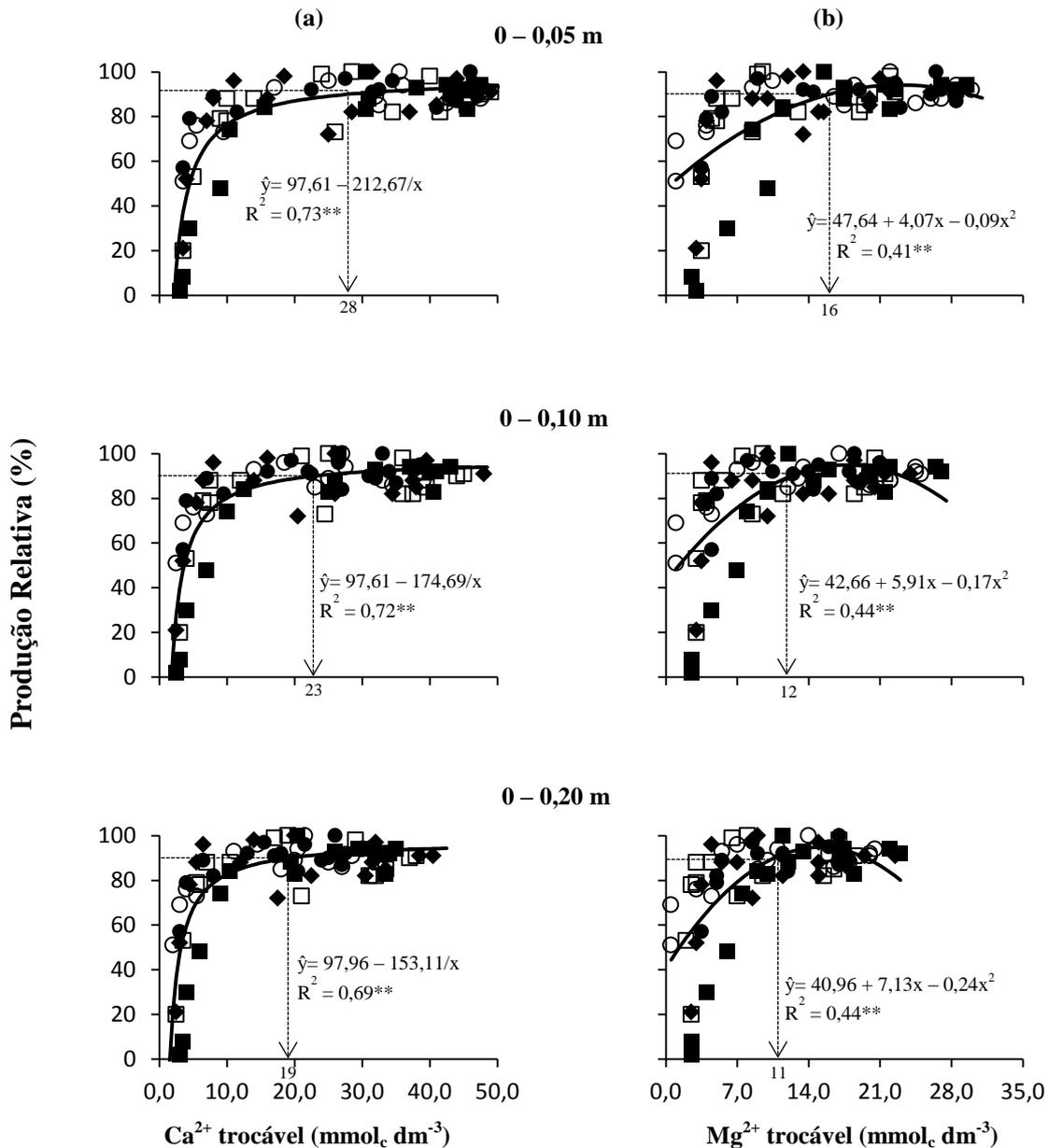


Figura 13. Relações entre a produção relativa (PR) de soja e os teores de Ca^{2+} trocável (a) e Mg^{2+} trocável (b), nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. ●: PR de soja, cv. CD 214 RR, em 2007–2008; ○: PR de soja, cv. CD 206 RR, em 2009–2010; ■: PR de soja, cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011; □: PR de soja, cv. NA 5909 RG, em 2012–2013; ◆: PR de soja, cv. BMX Ativa RR, em 2013–2014. **: $P < 0,01$.

saturação por Al^{3+} . Dessa forma, considerando como referência as camadas de solo de 0–0,10 e 0–0,20 m, o teor de Al^{3+} trocável no solo foi um índice de maior precisão para o diagnóstico da toxicidade do Al para a cultura da soja do que a saturação por Al^{3+} .

As relações obtidas entre a produção relativa de soja e os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no solo mostraram efeitos positivos do fornecimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} pela aplicação de calcário dolomítico para a produção de soja (Figura 13). Os níveis críticos de Ca^{2+} trocável no solo para a produção de soja foram de $28 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,05 m, $23 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,10 m e $19 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,20 m (Figura 13a). Para o Mg^{2+} trocável no solo, os níveis críticos foram de $16 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,05 m, $12 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,10 m e $11 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–0,20 m (Figura 13b). Resultado diferente para o teor de Ca^{2+} trocável foi encontrado por Fageria (2001b), o qual obteve um nível adequado de $40 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca^{2+} , enquanto no presente estudo esse teor foi de $19 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 0–0,20 m. Para o Mg^{2+} trocável, o nível crítico encontrado no presente estudo, de $11 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, foi semelhante ao obtido por Fageria (2001b), de $14 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. De acordo com Miotto (2009), a manutenção dos teores de Ca e Mg no solo em níveis suficientes é o fator mais importante para o suprimento adequado desses nutrientes para as culturas de aveia, trigo e soja.

Para a saturação por Ca^{2+} e Mg^{2+} na CTC a pH 7,0 (Figura 14), os ajustes das equações não foram melhores do que os obtidos para os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (Figura 13), em todas as camadas de solo avaliadas (0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m). Isso significa que a saturação por Ca^{2+} e Mg^{2+} no complexo de troca catiônica não melhorou a interpretação da disponibilidade desses nutrientes no solo para a produção de soja. Os níveis críticos de saturação por Ca^{2+} na CTC a pH 7,0 para a produção de soja foram de 25% na camada de 0–0,05 m, 20% na camada de 0–0,10 m e 18% na camada de 0–0,20 m. No caso da saturação por Mg^{2+} na CTC a pH 7,0, os níveis críticos foram de 13% na camada de 0–0,05

m, 12% na camada de 0–0,10 m e 11% na camada de 0–0,20 m. Resultados diferentes foram encontrados por Fageria (2001b) para a cultura da soja, tendo-se obtido nível adequado de saturação por Ca^{2+} e de Mg^{2+} na CTC a pH 7,0 de 51% e 18%, respectivamente, na camada de 0–0,20 m. Gaspar (2010) sugeriu que o equilíbrio das bases no solo, nas porcentagens de 55% de Ca^{2+} , 15% de Mg^{2+} e 5% de K^+ na CTC a pH 7,0 conferiram melhor equilíbrio nutricional para a cultura da soja.

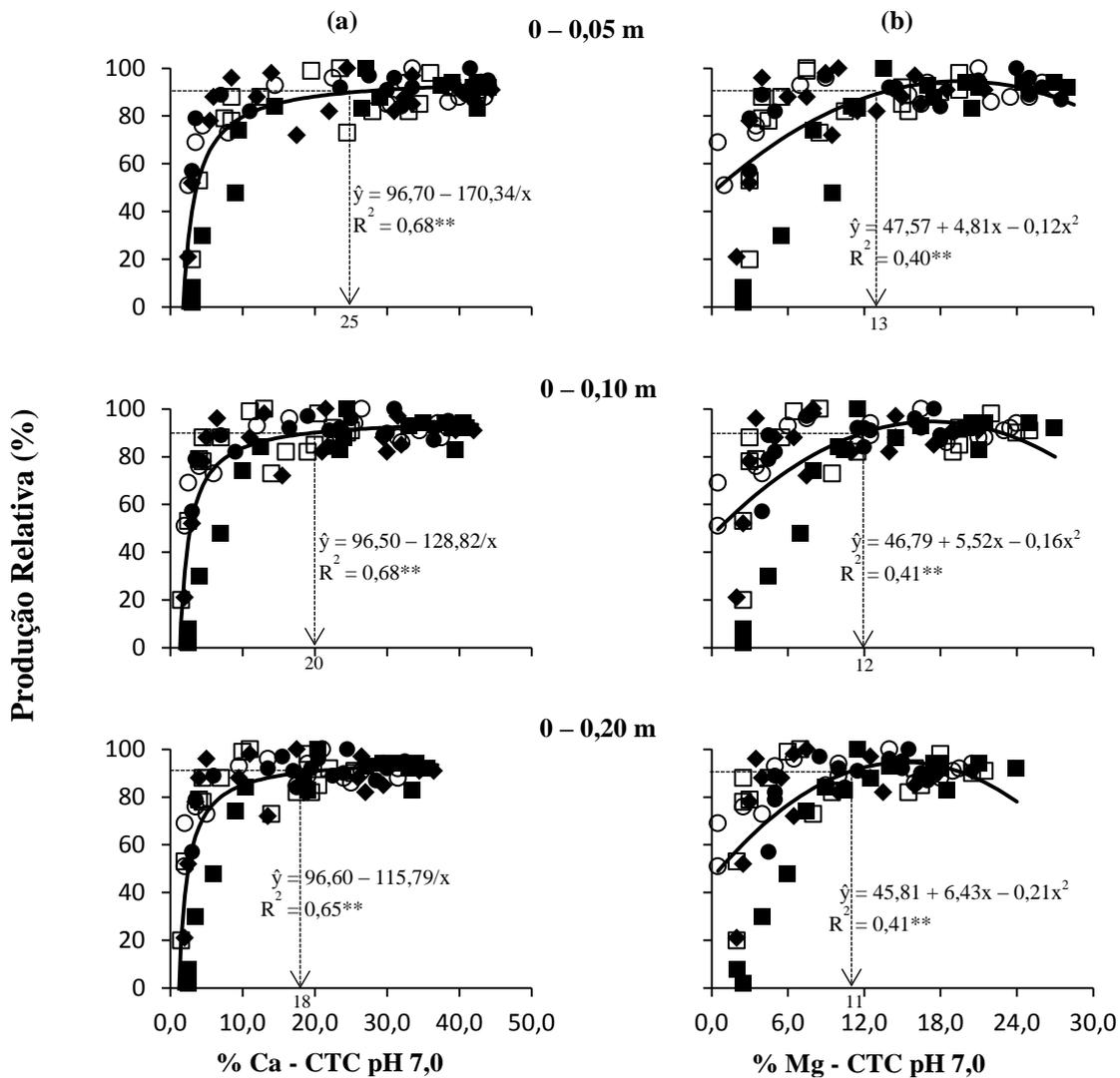


Figura 14. Relações entre a produção relativa (PR) de soja e a saturação por Ca^{2+} na CTC a pH 7,0 (a) e a saturação por Mg^{2+} na CTC a pH 7,0 (b), nas camadas de 0–0,05, 0–0,10 e 0–0,20 m. ●: PR de soja, cv. CD 214 RR, em 2007–2008; ○: PR de soja, cv. CD 206 RR, em 2009–2010; ■: PR de soja, cv. BMX Apollo RR, em 2010–2011; □: PR de soja, cv. NA 5909 RG, em 2012–2013; ◆: PR de soja, cv. BMX Ativa RR, em 2013–2014. **: $P < 0,01$.

5. CONCLUSÕES

A calagem na superfície em sistema plantio direto apresentou eficiência, em longo prazo, na correção da acidez do solo até a profundidade de 0,20 m. A redução da acidez do solo em camadas abaixo do local de aplicação do calcário não foi influenciada pela adição de fertilizante nitrogenado amoniacal.

A adubação com fertilizante nitrogenado amoniacal nas culturas de aveia preta ou trigo durante a estação de outono–inverno em sistema plantio direto acidificou o solo, ocasionando diminuição nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis, principalmente até a profundidade de 0,10 m, e aumento nos teores de Al^{3+} trocável até a profundidade de 0,20 m.

A acidificação do solo ocasionada pela adubação nitrogenada nas culturas de outono–inverno limitou severamente a produtividade de soja quando a calagem não foi realizada.

Tomando como referência a camada de 0–0,20 m, os níveis críticos no solo para a produção de cinco safras de diferentes genótipos transgênicos de soja, em variadas condições de clima, no sistema plantio direto foram: pH em CaCl_2 4,9, saturação por bases de 33%, teor de Al^{3+} trocável de $8,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, saturação por Al^{3+} de 30% , teor de Ca^{2+} trocável de $19 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e teor de Mg^{2+} trocável de $11 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

A correção da acidez do solo por meio da calagem na superfície em sistema plantio direto proporcionou importantes incrementos na produtividade de grãos de soja e mostrou ser uma prática fundamental para garantir altos tetos de produtividade de soja quando altas doses de nitrogênio amoniacal são aplicadas com frequência no sistema plantio direto.

6. REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J.C. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações. São Paulo, **ANDA**, 1992. (Boletim Técnico, 6)
- ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A. & CAIRES, E.F. Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.923-934, 2005.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; HINRICHS, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.359-367, 2004.
- ARAÚJO, S.R.; DEMATTE, J.A.M.; GARBUIO, F.J. Aplicação de calcário com diferentes graus de reatividade: alterações químicas no solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1755-1764, 2009.
- ASTERA, M. The Ideal Soil: A Handbook for the New Agriculture. **Chapter 2: Cation Exchange Capacity in Soils, Simplified**, SoilMinerals.com, v.2, 2014.
- BARTH, G. **Alterações provocadas pela calagem superficial em sistema plantio direto nos atributos químicos do solo, no sistema radicular, na produção de grãos e na nutrição e qualidade da soja**. Ponta Grossa, 2005. 82p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Ponta Grossa.
- CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.161-169, 2000a.
- CAIRES, E.F.; BARTH, G; GARBUIO, F.J; KUSMAN, M.T. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem em superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1011-1022, 2002.
- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003.
- CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.27-34, 1998.
- CAIRES, E.F.; DA 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, 2000b.
- CAIRES, E.F.; DA FONSECA, A.F.; FELDHAUS, I.C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.25, p.1029-1040, 2001.

CAIRES, E.F.; DA 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.315-327, 1999.

CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M. A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.87-98, 2006.

CAIRES, E.F., GARBUIO, F.J., CHURKA, S., BARTH, G.; CORRÊA, J.C.L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v.28, p.57-64, 2008.

CIOTTA, M. N.; C. BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob Plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1055-1064, 2002.

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; FERNANDES, D.M.; PERES, M.G.M. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1583-1590, 2008.

DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. **Plant Physiol**, v.107, p.315-321, 1995.

DERAL. **Precipitação de Ponta Grossa.** Disponível em: www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/pluvio.xls. Acesso em: 04 jan. 2015.

DIEHL, R. C.; MIYAZAWA, M.; TAKAHASHI, H. W. Compostos orgânicos hidrossolúveis de resíduos vegetais e seus efeitos nos atributos químicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2653-2659, Viçosa, 2008.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Produção de Sementes de *Arachis pintoi* cv. BRS Mandobi no Acre. **EMBRAPA Acre**. Sistema de Produção 4, 2011.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agricola**, v.58, p.825-831, 2001.

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

FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.5, p.416-424, 2001b.

FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2002. 77p.

FERREIRA, D. F. **Sisvar** - Sistema de Análise de Variância. 2006.

FOLONI, J. S. S., ROSOLEM, C.A. Efeito da calagem e sulfato de amônio no algodão. I - Transporte de cátions e ânions no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.425-432, 2006.

FRANCHINI, J.C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, M.A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.533-542, 1999.

GASPAR, G.G. **Efeito da saturação de cálcio no solo sobre a severidade da ferrugem da soja**. Londrina, 2010. 38p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina.

IAPAR. **Médias históricas de Ponta Grossa (1954-2001)**. Disponível em: http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Ponta_Grossa.htm. Acessado em 04/01/2015.

ISMAEL J.J.; VALERI S.V.; CORRADINI L.; ALVARENGA S.F.; VALLE C.F.; FERREIRA M.E.; BANZATTO D.A. Níveis crítico de fósforo no solo e nas folhas para a implantação de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, em quatro tipos de solos. **Scientia Forestalis**, Santa Maria, n.54, p. 29-40, 1998.

JORIS, H.A.W; CAIRES, E.F.; BINI, A.R.; SCHARR, D.A.; HALISKI, A. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v.365, p.409–424, 2013.

KAMPRATH, E.J. Potential detrimental effects from liming highly weathered soils to neutrality. **Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings**, Boca Raton, v.31, p.200-203, 1971.

LIMA, D.V.; KLIEMANN, H.J.; FAGERIA, N.; MORAES, M.F.; LEANDRO, W.M.; SEVERIANO, E C. Saturação por alumínio e relação Al/Ca para a cultura da soja em solos de cerrado. **Revista Agricultura Tropical**, Cuiabá, v.7, p.106-118, 2003.

LIMA, D.V.; MORAES, M.F.; KLIEMANN, H.J.; LEANDRO, W.M.; Calagem e manganês na cultura da soja em solos da Região de Rio Verde-GO. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v.11, p.37-46, 2007.

LOPES, A.S. **Solos sob cerrado**: manejo da fertilidade para a produção agropecuária. São Paulo, ANDA, 1994 (2ª ed). 62p. (boletim técnico, 5)

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

LOPES, A.S & GUILHERME L.R.G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. 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 de Ciência do Solo, p.2-61, 2007.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 175-187, 2004.

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

MALAVOLTA, E. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Editora agrônômica Ceres Ltda. 1980. 251 p.

MARQUES, S.R.; WEILL, M.A.M.; SILVA, L.F.S. Qualidade física de um Latossolo Vermelho, perdas por erosão e desenvolvimento do milho em dois sistemas de manejo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, p.967-974, jul./ago., 2010.

MASCARENHAS, H. A. A.; BRAGA, R. N.; BUSILANI, E. A.; FEITOSA, C. T.; HIROCE, R.; BATAGLIA, O.C. Efeito do corretivo sobre a soja cultivada em um solo de cerrado contendo Al e Mn. In: **SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA**, 1981. Brasília, DF.

MASCARENHAS, H. A. A.; MIYASAKA, S.; TOSHIO IGUE; FREIRE, E. S.; GUIDO DI SORDI. Respostas da soja à calagem e a adubações minerais com fósforo e potássio em solo latossolo roxo. **Bragantia**, v.28, 1969.

MIOTTO, A. **Calcários calcíticos e dolomíticos e alterações nos atributos de solos e plantas sob sistema de plantio direto**. Santa Maria: UFSM, 2009. 78p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria.

MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C. Efeito residual do calcário na produção de milho e soja em solo Glei Pouco Húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.209-215, 2000.

MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C.; REIN, T. A.; GOMES, A. C. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.40, p.563-572, 2005.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.411-416, 1993.

MUZILLI, O.; SANTOS, D.; PALHANO, J.B.; MANETTI FILHO, J.; LANTMANN, A.F.; GARCIA, A.; CATANEO, A. Tolerância de cultivares de soja e de trigo a acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.2, p.34-40, 1978.

MUZILLI, O. Princípios e perspectivas de expansão. In: Plantio direto no Estado do Paraná. Londrina, **Instituto Agrônomo do Paraná**, 1981, p.11-16 (Circular, 23).

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.237-247, 2008.

OLIVEIRA, F.A. de; CARMELLO, Q.A. de C.; MASCARENHAS, H.A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-devegetação. **Scientia Agricola**, v.58, p.329-335, 2001.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.e BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.2, p.393-486, 2002.

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, v.38, p.47-57, 1996.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminium following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.33-38, 1984.

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)

PEREIRA, J.B.M.; GOMES, T.C.A. Níveis críticos de fósforo disponível para alguns solos do Acre. **Embrapa Acre**, Rio Branco, p.1-2, 1998.

QUAGGIO, J. A.; MASCARENHAS, H. A. A.; BATAGLIA, O. C. Respostas de soja à aplicação de doses crescentes de calcário em Latossolo Roxo distrófico de cerrado. II – Efeito residual. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v.6, p.113-118, 1982.

QUAGGIO, J. A.; RAMOS, V. J.; BATAGLIA, O. C.; RAIJ, B. Calagem para sucessão batata-triticales-milho usando calcários com diferentes teores de magnésio. **Bragantina**, Campinas, SP, v.44, p.391-406, 1985.

QUAGGIO, J.A. Reação do solo e seu controle. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, Campinas, 1986. **Anais**. Campinas, Fundação Cargill, 1986. p.53-89.

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

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba, SP, International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RAIJ, B. van; CAMARGO, P. A.; MASCARENHAS, H. A. A.; HIROCE, R.; FEITOSA, C. T.; NERY, C.; LAUN, C. R. P. Efeitos de níveis de calagem na produção de soja em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.28-31, 1977.

RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa, MG; Universidade Federal de Viçosa, 2001. 301p.

RICE, C. W. Potencial to reduce agricultural emissions of CO₂ to atmosphere and the strategies to increase carbon sequestration. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO E MEIO AMBIENTE: sequestro de carbono e qualidade da água. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2005. p.53-57.

ROSADO, T.L.; GONTIJO, I.; ALMEIDA, M.S.; ANDRADE, F.V. Fontes e doses de nitrogênio e alterações nos atributos químicos de um latossolo cultivado com capim-mombaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.840-849, 2014.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; OLIVEIRA, R.H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.301-309, 2003.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.1486-1499, 2001.

SALET, R.L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R.A. Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, Cruz Alta, v.1, p.9-13, 1999.

SANTI, A.; AMADO, T.J.C.; ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1075-1083, 2003.

SARMENTO, P.; RODRIGUES, L.R.A.; CRUZ, M.C.P.; LUGÃO, S.M.B.; CAMPOS, F.P.; CENTURION, J.F.; FERREIRA, M.E. Atributos químicos e físicos de um Argissolo cultivado com *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio, sob lotação rotacionada e adubado com nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.183-193, 2008.

SHARMA, A.D.; SHARMA, H.; LIGHTFOOT, D.A. The genetic control of tolerance to aluminum toxicity in the 'Essex' by 'Forrest' recombinant inbred line population. **Theor Appl Genet**, v.122, p.687-694, 2011.

SISTEMA DE MONITORAMENTO AGROMETEOROLÓGICO DA FUNDAÇÃO ABC (smaABC). Dados climáticos de Ponta Grossa – PR, 2012.

SMYTH, T.J. & CRAVO, M.S. Aluminum and calcium constraints to continuous crop production in a brazilian amazon Oxisol. **Agronomy Journal**, v.84, p.843-850, 1992.

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 de Ciência do Solo, p.205-275, 2007.

SOUZA, W. J. O.; MELO, W. J. Teores de nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica sob diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v.24, p.885-896, 2000.

VIEIRA, R.C.B.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; ANGHINONI, I.; ERNANI, P.R.; MORAES, R.P. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em Latossolos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.188–198, 2013.