

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA

MESTRADO

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E RESPOSTA DA SUCESSÃO MILHO-
CEVADA-FEIJÃO-TRIGO INFLUENCIADOS POR DOSES E PARCELAMENTO
DE GESSO EM PLANTIO DIRETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LEANDRO MICHALOVICZ

GUARAPUAVA-PR

FEVEREIRO/2012

LEANDRO MICHALOVICZ

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E RESPOSTA DA SUCESSÃO MILHO-
CEVADA-FEIJÃO-TRIGO INFLUENCIADOS POR DOSES E PARCELAMENTO
DE GESSO EM PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro- Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller
Orientador

GUARAPUAVA-PR
FEVEREIRO/2012

Catálogo na Publicação
Biblioteca da UNICENTRO, Campus CEDETEG

Michalovicz, Leandro

M582a Atributos químicos do solo e resposta da sucessão milho-cevada-feijão-trigo influenciados por doses e parcelamento de gesso em plantio direto / Leandro Michalovicz. -- Guarapuava, 2012
xi, 41 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, 2012

Orientador: Marcelo Marques Lopes Müller

Banca examinadora: Jackson Kawakami, Eduardo Favero Caires

Bibliografia

1. Agronomia. 2. Produção vegetal. 3. Fosfógeno. 4. Alumínio trocável. 5. Cálcio. 6. Magnésio. 7. Enxofre. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

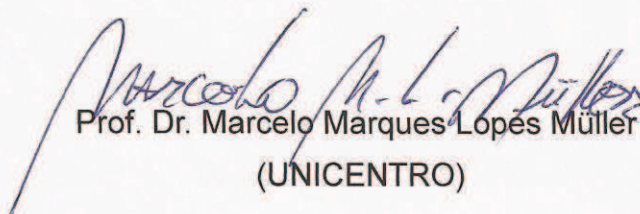
CDD 631.8

LEANDRO MICHALOVICZ

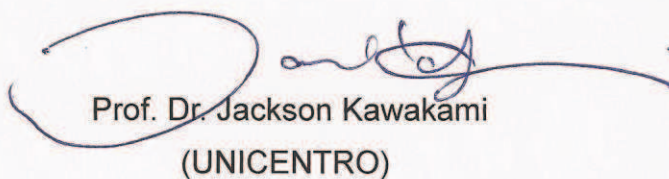
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E RESPOSTA DA SUCESSÃO
MILHO-CEVADA-FEIJÃO-TRIGO INFLUENCIADOS POR DOSES E
PARCELAMENTO DE GESSO EM PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

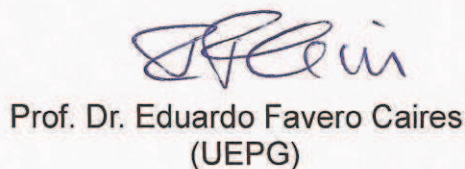
Aprovada em 29 de fevereiro de 2012.



Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Jackson Kawakami
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Eduardo Favero Caires
(UEPG)

GUARAPUAVA-PR
2012

DEDICO

Aos meus pais Edevino Michalovicz e Maria Michalovicz, pelo amor concedido e por acreditarem na importância da educação. Vocês são meu alicerce, e terão meu amor para sempre.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por prover saúde, proteção e conforto em todos os momentos.

A minha família, em especial aos meus pais Edvino e Maria, meus irmãos Solange, Márcio, Cristiane e Edson, e meus sobrinhos Henrique e Gabriel, pelo apoio e amor incondicionais dedicados durante toda a minha vida.

À Cristiane N. Kondo, que esteve ao meu lado durante esta caminhada.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), pela oportunidade de realizar os cursos de Graduação e Pós Graduação em Agronomia.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho Alex Benaski,, Alex Renan Nouvaczik, Cristiano Ortolan, Éliton Ianisk, Fábio Ortolan, Ivan Kowaltschuk, Leandro Meert, Luis F. Kramer, Marcelo Vicensi, Ronaldo Nascimento, Tales Roberto Galina e Willian Satil, que não pouparam esforços e estiveram juntos comigo desde o primeiro dia de trabalho.

Aos docentes do Curso de Pós Graduação em Agronomia, em especial ao professor Dr. Marcelo Marques Lopes Müller, não somente pelas incontáveis horas de orientação dedicadas a mim, mas especialmente pela sincera amizade construída durante os trabalhos que realizamos juntos.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos.

A todos que não foram citados, mas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e concretização deste sonho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. CAPÍTULO I - ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM FUNÇÃO DE DOSES E PARCELAMENTO DE GESSO AGRÍCOLA.....	4
3.1. Resumo.....	4
3.2. Abstract.....	5
3.3. Introdução.....	6
3.4. Material e Métodos.....	7
3.5. Resultados e Discussão.....	9
3.6. Conclusões.....	20
4. CAPÍTULO II - NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA SUCESSÃO MILHO-CEVADA-FEIJÃO-TRIGO INFLUENCIADOS POR DOSES E PARCELAMENTO DE GESSO AGRÍCOLA EM PLANTIO DIRETO.....	21
4.1. Resumo.....	21
4.2. Abstract.....	22
4.3. Introdução.....	23
4.4. Material e Métodos.....	24
4.5. Resultados e Discussão.....	25
4.6. Conclusões.....	36
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Médias históricas (1976-2010) e observadas (Nov/2009 a Set.2011) de precipitação pluvial (mm) e temperatura (°C) em Guarapuava-PR.....	8
Figura 2. Valores de pH em camadas de solo em função de doses e parcelamento do gesso agrícola, aplicado na superfície do solo em plantio direto.....	10
Figura 3. Teores de Al ³⁺ em camadas de solo em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície do solo em plantio direto.....	12
Figura 4. Teores de Ca ²⁺ em camadas de solo em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície do solo em plantio direto.....	13
Figura 5. Teores de Mg ²⁺ em camadas de solo em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície do solo em plantio direto.....	15
Figura 6. Teores de K ⁺ em camadas de solo em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície do solo em plantio direto.....	17
Figura 7. Teores de S-SO ₄ ²⁻ em camadas de solo em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície do solo em plantio direto.....	19
Figura 8. Teores foliares de N e P das culturas em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto.....	26
Figura 9. Teores foliares de Ca e Mg das culturas em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto.....	28
Figura 10. Relação Ca/Mg e teores foliares de S das culturas em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto.....	30
Figura 11. Produtividade de milho na safra 2009-2010 em função de doses de gesso agrícola aplicadas na superfície em plantio direto.....	31

Figura 12.	Produtividade de cevada na safra 2010 em função de doses de gesso agrícola aplicadas na superfície em plantio direto.....	32
Figura 13.	Relação entre produtividade relativa de cevada na safra 2010 e teores de S-SO ₄ ²⁻ (extraído por fosfato de cálcio 0,01 mol l ⁻¹) na camada de 0,0-0,2 m.....	34
Figura 14.	Produtividade de feijão na safra 2010/2011 em função de doses e parcelamento de gesso agrícola aplicado na superfície em plantio direto.....	35
Figura 15.	Produtividade de trigo na safra 2011 em função de doses e parcelamento de gesso agrícola aplicado na superfície em plantio direto.....	36
Figura 16.	Produtividade acumulada (Σ das produtividades do milho+cevada+feijão+trigo) em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto.....	37

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Atributos químicos do solo da área experimental (Guarapuava, 2009).....	7

RESUMO

MICHALOVICZ, L. Atributos químicos do solo e resposta da sucessão milho-cevada-feijão-trigo influenciados por doses e parcelamento de gesso em plantio direto.

Os efeitos de doses e parcelamento de gesso agrícola sobre os atributos químicos de um Latossolo Bruno sob plantio direto, bem como sobre a nutrição e a produtividade de milho, cevada, feijão e trigo foram avaliados entre 2009 e 2011, em Guarapuava-PR. O experimento foi realizado em blocos casualizados com quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos de quatro doses de gesso agrícola (3, 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹), sem e com parcelamento (50% + 50% - dois anos), mais uma testemunha sem gesso. O solo foi amostrado em camadas entre 0,0-0,8 m de profundidade, aos seis e 18 meses após a 1ª aplicação de gesso. Também foram avaliados os teores foliares de nutrientes e as produtividades das culturas, sendo os resultados submetidos às análises de variância e de regressão. As doses de gesso promoveram acréscimo de pequena magnitude no pH do solo nas camadas subsuperficiais, e elevaram os teores de Ca²⁺ e S-SO₄²⁻ em todas as camadas avaliadas, não havendo efeito do parcelamento somente para o Ca²⁺ nas camadas entre 0,4-0,8 m. Os teores de Al³⁺, Mg²⁺ e K⁺ diminuíram em algumas camadas de solo com a aplicação do gesso, e os teores de P do solo aumentaram com a adição de gesso, mas apenas na camada de 0,0-0,1 m aos 18 meses da aplicação. O parcelamento das doses de gesso diminuiu a intensidade da movimentação de Ca²⁺, Mg²⁺ e S-SO₄²⁻ para as camadas subsuperficiais, principalmente entre 0,4-0,8 m. Houve acréscimo nos teores foliares de N e P na cultura do feijão com a aplicação de gesso, havendo efeito positivo do parcelamento para o N. Os teores foliares de Ca, S e a relação Ca/Mg aumentaram nas culturas avaliadas com as doses de gesso, havendo efeito positivo do parcelamento sobre os teores foliares de S. Os teores foliares de Mg decresceram no milho, feijão e trigo, com efeito negativo do parcelamento sobre o trigo. Não houve efeito dos tratamentos sobre os teores foliares de K em nenhuma das culturas avaliadas. As produtividades de milho, cevada e trigo apresentaram resposta quadrática às doses de gesso, com produtividades máximas estimadas 11%, 10% e 10% superiores em relação à testemunha, respectivamente, não havendo efeito do parcelamento das doses sobre a produtividade das culturas. Não houve efeito dos tratamentos sobre a produtividade do feijão, e a resposta da produtividade acumulada foi quadrática em relação às doses de gesso, com produtividades máximas estimadas em 6,5% e 9,6% acima da obtida com a testemunha, nas doses não parceladas e parceladas, respectivamente.

Palavras-Chave: Fosfogesso, alumínio trocável, cálcio, magnésio, enxofre.

ABSTRACT

MICHALOVICZ, L. Soil chemical attributes and response of maize-barley-bean-wheat succession affected by rates and splitting of gypsum in no-till system.

The effects of gypsum rates and splitting on chemical attributes of a Brown Latossol under no-till system, along with nutrition and yield of maize, barley, bean and wheat were evaluated between 2009 and 2011 at Guarapuava, Paraná State, Brazil. A randomized complete block design experiment was used, with four replications. The treatments were constituted by four rates of gypsum (3, 6, 9 and 12 Mg ha⁻¹), applied without and with splitting (50% + 50% - in two years), plus a control treatment without gypsum. Soil sampling was performed in layers between 0,0-0,8 m depth, at six and 18 months after the first gypsum application. Leaf content of nutrients and grain yield of crops were also evaluated. Results were submitted to analysis of variance and regression. Gypsum rates promoted small magnitude increase of soil pH at subsuperficial layers, and also increased levels of Ca²⁺ and S-SO₄²⁻ in all evaluated soil layers, without effect of splitting only for Ca²⁺ at layers between 0,4-0,8 m depth. Soil levels of Al³⁺, Mg²⁺ and K⁺ decreased in some layers with gypsum addition, and levels of P in the soil were increased only at 0,0-0,1 m layer at 18 months after application. Splitting gypsum rates decreased movement intensity of Ca²⁺, Mg²⁺ and S-SO₄²⁻ towards subsurface layers, mainly between 0,4-0,8 m depth. Gypsum increased N and P concentrations in the leaves of beans, showing positive effect of splitting for N. Leaf levels of Ca, S and the Ca/Mg ratio in leaves were increased in all crops evaluated with gypsum application, with positive effect of splitting for leaf concentration of S. Leaf levels of Mg decreased in maize, bean and wheat, with negative effect of splitting for wheat. There was no effect of treatments on leaf concentration of K, in all crops evaluated. Maize, barley and wheat yields showed quadratic response to gypsum rates, with grain yields 11%, 10% and 10% higher in relation to control treatment, respectively, without effect of splitting the rates of gypsum. There was no effect of treatments on the yield of beans. Cumulative yield showed quadratic response to gypsum rate increase, with maximum yields estimated with 6,5% and 9,6% increase in relation to control treatment for non splitted and splitted rates, respectively.

Keywords: Phosphogypsum, exchangeable aluminum, calcium, magnesium, sulfur.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o 2º maior importador mundial de fertilizantes fosfatados, além de ser o 3º maior importador de potássio (K), nitrogênio (N) e fertilizantes formulados (NPK) em todo o mundo (IFA, 2007). Esse elevado consumo de fertilizantes se justifica pelo fato de os solos brasileiros, de maneira geral, apresentarem características químicas naturais como: deficiência e alta taxa de retenção de fósforo (P), baixos teores de cátions básicos e elevada saturação por alumínio (m%).

Somando-se, a essas características naturais, a adoção do sistema plantio direto na palha (PD), que impossibilitou o revolvimento do solo para a incorporação de corretivos em subsuperfície ao longo dos anos, muitos solos agrícolas começaram a apresentar toxidez por alumínio (Al) e/ou deficiência de cálcio (Ca) nas camadas subsuperficiais, promovendo uma “barreira química” ao desenvolvimento normal de raízes em profundidade, com diminuição da capacidade das plantas em absorver água, o que afeta negativamente a produtividade das culturas (LOPES et al., 2004).

O gesso agrícola, por sua alta solubilidade em relação ao calcário, possui a capacidade de se movimentar para as camadas mais profundas do solo, melhorando o ambiente radicular em subsuperfície por meio do aumento nos teores de Ca^{2+} e diminuição na toxidez de Al^{3+} , pela formação de espécies menos tóxicas com o enxofre, na forma de sulfato (S-SO_4^{2-}), bem como com o flúor, na forma de fluoreto (F). Essa melhoria química do ambiente radicular pode promover maior distribuição de raízes ao longo do perfil de solo, com benefícios que variam de acordo com a cultura em questão.

Plantas com sistema radicular mais desenvolvido exploram um volume maior de solo, e podem aproveitar melhor a água e os nutrientes das camadas mais profundas. Dessa forma, a aplicação de gesso pode promover uma melhoria na recuperação de nutrientes ao longo do perfil do solo, citando-se como exemplo o N, que na forma de nitrato (N-NO_3^-) geralmente fica retido nas camadas subsuperficiais do solo (RAIJ, 2008).

Os efeitos do gesso agrícola sobre os atributos químicos do solo, embora variáveis em intensidade, têm-se repetido nos estudos realizados, com relatos freqüentes da ocorrência de elevação nos teores de Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} e lixiviação ou mobilização de Mg^{2+} (QUAGGIO et al., 1993; TOMA et al., 1999; CAIRES et al., 2003; RAMPIM et al., 2011).

Para a nutrição das culturas, os resultados da aplicação de gesso têm apresentado variabilidade, tendo sido relatadas alterações nos teores de nutrientes nos tecidos tanto em poáceas quanto em fabáceas. Os resultados mais comumente citados são a elevação de teores foliares de Ca e S (SORATTO e CRUSCIOL, 2008; SILVA et al., 1997) e diminuição nos teores de Mg (CAIRES et al., 2003). A produtividade das culturas, por sua vez, também tem apresentado resultados variáveis à gessagem. De maneira geral, poáceas como milho (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*) e cevada (*Hordeum vulgare*) apresentam acréscimos de produtividade em resposta à aplicação de gesso (VILELA et al., 1995; RASHID et al., 2008; CAIRES et al., 2001;), enquanto fabáceas como feijão (*Phaseolus vulgaris*) e soja (*Glycine max* L. Merrill.) não têm apresentado respostas em produtividade (QUAGGIO et al., 1993; SORATTO et al., 2010).

A aplicação do gesso agrícola na agricultura foi intensamente estudada na década de 1980 em função da grande quantidade produzida no Brasil, que atingiu, no ano de 2000, cerca de $4,8 \times 10^6$ Mg ano⁻¹ (LYRA SOBRINHO et al., 2000), reflexo do grande consumo de fertilizantes fosfatados, dos quais o gesso é subproduto, mas o interesse pelo gesso e o número de trabalhos publicados diminuiu com o passar do tempo.

Ainda não há consenso sobre as situações em que se podem esperar efeitos benéficos do gesso, nem quais seriam as doses ideais para que esses efeitos fossem alcançados. No entanto, sabendo-se da sua capacidade de melhorar o ambiente radicular de subsolos ácidos e fornecer nutrientes para as culturas, a gessagem pode ser uma técnica de grande valor para o Brasil, bem como para outros países, tendo em vista a crescente adoção de PD e que os solos ácidos ocupam cerca de 25,9% da área total de solos no mundo (ESWARAN et al., 1997).

A experimentação regionalizada pode permitir a identificação dos principais parâmetros (condições edafoclimáticas, espécie, cultivar utilizada, etc.) a serem considerados para que efeitos benéficos da gessagem sejam alcançados, permitindo recomendações mais seguras e confiáveis. Portanto, considerando-se as características químicas dos solos da região Centro-Sul do Paraná, naturalmente ácidos, pobres em bases e ricos em Al, faz-se necessário estudar a ação do gesso agrícola sobre a fertilidade dos solos da região, bem como conhecer os seus efeitos sobre a nutrição e a produtividade das espécies mais utilizadas nos sistemas de rotação de culturas.

2. OBJETIVOS

O estudo teve como objetivos caracterizar os efeitos da aplicação de gesso agrícola, com ou sem parcelamento, sobre os atributos químicos das camadas superficiais e subsuperficiais de um Latossolo Bruno muito argiloso, bem como seus efeitos na nutrição e na produtividade de culturas de reconhecida importância como milho, trigo, cevada e feijão.

3. CAPÍTULO I - ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM FUNÇÃO DE DOSES E PARCELAMENTO DE GESSO AGRÍCOLA.

3.1. Resumo - Entre 2009 e 2011, avaliaram-se doses de gesso agrícola e seu parcelamento sobre atributos químicos de um Latossolo Bruno sob plantio direto em Guarapuava-PR. O delineamento utilizado foi de blocos casualizados com arranjo fatorial (4x2+1) e quatro repetições. Os tratamentos resultaram da combinação de quatro doses de gesso (3, 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹), aplicadas sem parcelamento e parceladas em 50 + 50% (dois anos), mais uma testemunha. Amostras de solo, das camadas entre 0,0-0,8 m de profundidade, foram coletadas aos seis e 18 meses após a primeira aplicação de gesso. Houve pequeno acréscimo do pH do solo em subsuperfície pela aplicação de gesso, assim como dos teores de P na camada de 0,0-0,1 m. Os teores de Ca²⁺ e S-SO₄²⁻ aumentaram com a aplicação de gesso em todas as camadas avaliadas, sem e com parcelamento. A aplicação de gesso diminuiu os teores de Al³⁺ em algumas camadas, assim como os teores de K⁺ e, mais pronunciadamente, de Mg²⁺ nas camadas superficiais, com aumento dos teores de Mg²⁺ em subsuperfície. O gesso melhorou a condição de fertilidade no perfil do solo, e o parcelamento reduziu a intensidade de mobilização de Ca²⁺, Mg²⁺ e S-SO₄²⁻, principalmente nas camadas entre 0,4-0,8 m.

Palavras-Chave: Fosfogesso, cálcio, magnésio, enxofre, alumínio trocável.

CHEMICAL ALTERATIONS OF A SOIL UNDER NO-TILL DUE TO RATES AND SPLIT APPLICATION OF GYPSUM.

3.2. Abstract - Between 2009 and 2011, the effects of rates and splitting of gypsum on chemical attributes of a Brown Latossol under no till were evaluated in Guarapuava, Paraná State. The experiment was installed in a randomized complete block design, with factorial arrangement (4x2+1) and four replications. Treatments resulted from the combination of four rates of gypsum (3, 6, 9 and 12 Mg ha⁻¹) without splitting and split in 50 + 50% (two years), plus a control (0 Mg ha⁻¹ gypsum). Soil sampling was performed at six and 18 months after the first gypsum application, in layers between 0.0-0.8 m depth. There was little increase on soil pH at subsuperficial layers with gypsum, as well as on P levels at 0,0-0,1 m layer. Levels of Ca²⁺ and S-SO₄²⁻ increased with gypsum supply in all evaluated layers, with and without splitting the rates. Gypsum application decreased Al³⁺ levels in some layers, as well as levels of K⁺ and, more pronouncedly, Mg²⁺ on superficial layers, with Mg²⁺ increase in subsurface. Gypsum promoted better fertility conditions on soil profile, and splitting reduced the extent of mobilization of Ca²⁺, Mg²⁺ and S-SO₄²⁻, mainly at layers between 0,4-0,8 m depth.

Keywords: Phosphogypsum, calcium, magnesium, sulfur, exchangeable aluminum.

3.3. Introdução

Solos ácidos ocupam 70% da área total dos solos no Brasil, predominando em todas as regiões, exceto nas do semi-árido. Tais solos geralmente apresentam elevada acidez, alto teor de alumínio trocável (Al^{3+}) e baixos teores de cátions básicos, o que reduz pela metade a produtividade das culturas em 40% das áreas cultivadas nestas condições (QUAGGIO, 2000).

Com a calagem, atenuou-se a acidez e a toxidez por Al nas camadas de solo onde o calcário foi incorporado, permitindo obter-se produtividades satisfatórias com culturas anuais. Para tanto, adotou-se a camada de 0,0-0,2 m de solo tanto para recomendação quanto para incorporação de corretivos em preparo convencional (PC), sendo comum a formação de uma “barreira química” abaixo dessa profundidade, caracterizada por baixos teores de bases e teores tóxicos de Al^{3+} na solução, principal fator de acidez do solo que limita o enraizamento e a produtividade das culturas (CHAVES et al., 1988; PAVAN et al., 1984).

Em áreas convertidas ao plantio direto (PD), a correção da acidez sem incorporação do calcário é restrita às camadas próximas da superfície, em função da pequena movimentação vertical do calcário nesta condição, sobretudo em solos argilosos (AMARAL; ANGHINONI, 2001), fazendo com que a “barreira química” continue existindo no perfil, mas a partir de profundidades ainda menores. Como a adoção do PD é crescente no Brasil, tem-se retomado o interesse no uso de gesso agrícola, visando melhorar a fertilidade do solo em camadas subsuperficiais. Mais solúvel que o calcário, o gesso é fonte de nutrientes e corrige os teores de Al^{3+} em subsuperfície, qualificando-se como condicionador de solo (RAIJ, 1988).

Aplicado em superfície, o sulfato de cálcio (CaSO_4) do gesso se movimenta para o subsolo com o excesso de umidade, elevando os teores de cálcio (Ca^{2+}) e enxofre (S-SO_4^{2-}), reduzindo a toxidez do alumínio e favorecendo o enraizamento das plantas (SUMNER, 1995). Benefícios do gesso sobre a fertilidade do solo têm sido relatados em vários estudos com PD. Caires et al. (2001) avaliaram o uso de gesso em Latossolo Vermelho argiloso, observando elevação dos teores de Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} e da relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ do solo. Rampim et al. (2011), em Latossolo Vermelho argiloso, observaram elevação dos teores de Ca^{2+} e da relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ do solo com a gessagem. Caires et al. (2011b), aplicando até 12 Mg ha⁻¹ de gesso em Latossolo Vermelho argiloso de alta fertilidade inicial (0,0-0,4 m), observaram maior relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e maiores teores de P na superfície e de Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} em subsuperfície.

O uso de gesso também traz mobilização de magnésio (Mg^{2+}) de camadas superficiais para camadas mais profundas do solo (CAIRES et al., 2004; FOLONI et al., 2008), sendo importante adotar estratégias para reduzir ou compensá-la, principalmente quando as doses de gesso são elevadas e os teores iniciais de Mg^{2+} estão próximos do nível crítico na superfície. O uso de calcário dolomítico pode garantir maiores teores de Mg^{2+} em superfície (CAIRES et al., 2003), sobretudo em PD. Por outro lado, também é possível parcelar as doses de gesso, uma vez que, no caso dos fertilizantes, esta técnica é uma das principais práticas recomendadas para controlar a lixiviação de nutrientes (LOPES; GUILHERME, 2000).

Este trabalho teve por objetivo caracterizar os efeitos de doses de gesso agrícola, com ou sem parcelamento, sobre os atributos químicos de um Latossolo Bruno argiloso da Região Centro-Sul do Paraná.

3.4. Material e Métodos

O experimento foi realizado no Campo Experimental do Departamento de Agronomia da UNICENTRO, em Guarapuava (PR). A área foi manejada sob PD e cultivada com a sucessão milho (silagem)/aveia+azevém entre os anos de 2005 e 2009. Em outubro de 2009, uma trincheira foi aberta para estudo morfológico, caracterização química (PAVAN et al., 1992) e granulométrica (EMBRAPA, 1997) do solo (Tabela 01), identificando-se o perfil como sendo de Latossolo Bruno (EMBRAPA, 2006).

Tabela 01. Caracterização química e teor de argila no perfil de Latossolo Bruno em outubro de 2009, antes do início do experimento (Guarapuava, 2009).

Horiz. ⁽¹⁾	Prof. ⁽²⁾	C	P ⁽³⁾	S-SO ₄ ²⁻	pH	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	V	Argila
	m	g dm ⁻³	--mg dm ⁻³ --	CaCl ₂		-----cmol _c dm ⁻³ -----					%	g kg ⁻¹
A	0,0-0,3	21	1,1	4,7	5,4	0,20	4,96	5,01	2,66	0,26	61	720
AB	0,3-0,5	21	0,3	10,5	4,5	0,40	7,66	1,10	1,07	0,08	22	780
BA	0,5-0,8	11	0,5	13,3	4,7	0,40	6,18	0,85	1,14	0,04	25	810
Bw1	0,8-1,1	10	0,3	4,4	4,7	0,00	5,74	0,65	0,76	0,04	20	830
Bw2	1,1-1,4+	6	0,2	3,8	5,3	0,00	3,68	0,29	0,22	0,04	13	820

¹Horizonte pedológico; ²Profundidade; ³P extraído por Mehlich I e S extraído em CaHPO₃ 0,01 mol l⁻¹.

O tipo climático (Köppen-Geiger) na região é Cfb (PEEL et al., 2007), sendo que os dados de precipitação e temperatura durante o período experimental (Figura 1) foram obtidos

na estação meteorológica do Instituto Agronômico do Paraná, localizada a 25° 23' S, 51° 30' O e 1.026 m altitude, dentro do *Campus* universitário a cerca de 200 m do experimento.

O delineamento utilizado foi de blocos casualizados (DBC) em arranjo fatorial 4x2+1, com quatro repetições e unidades experimentais medindo 16,0 x 6,4 m. Os tratamentos resultaram do uso de 3, 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹ de gesso, aplicadas sem parcelamento (100% da dose de gesso em novembro de 2009) e parceladas em dois anos (50 + 50% da dose de gesso em novembro de 2009 e 2010), mais uma testemunha sem gesso (0 Mg ha⁻¹).

As doses de gesso utilizadas representaram, respectivamente, 33, 66, 100 e 133% da quantidade necessária para elevar a saturação por cálcio na capacidade de troca de cátions (CTC_{pH 7,0}) a 60% no horizonte A1 (Tabela 1), sendo aplicadas a lanço na superfície do solo no momento da semeadura das espécies de verão, que tiveram a seguinte ordem de implantação na sucessão de culturas: milho (nov/2009), cevada (jul/2010), feijão (nov/2010) e trigo (jul/2011).

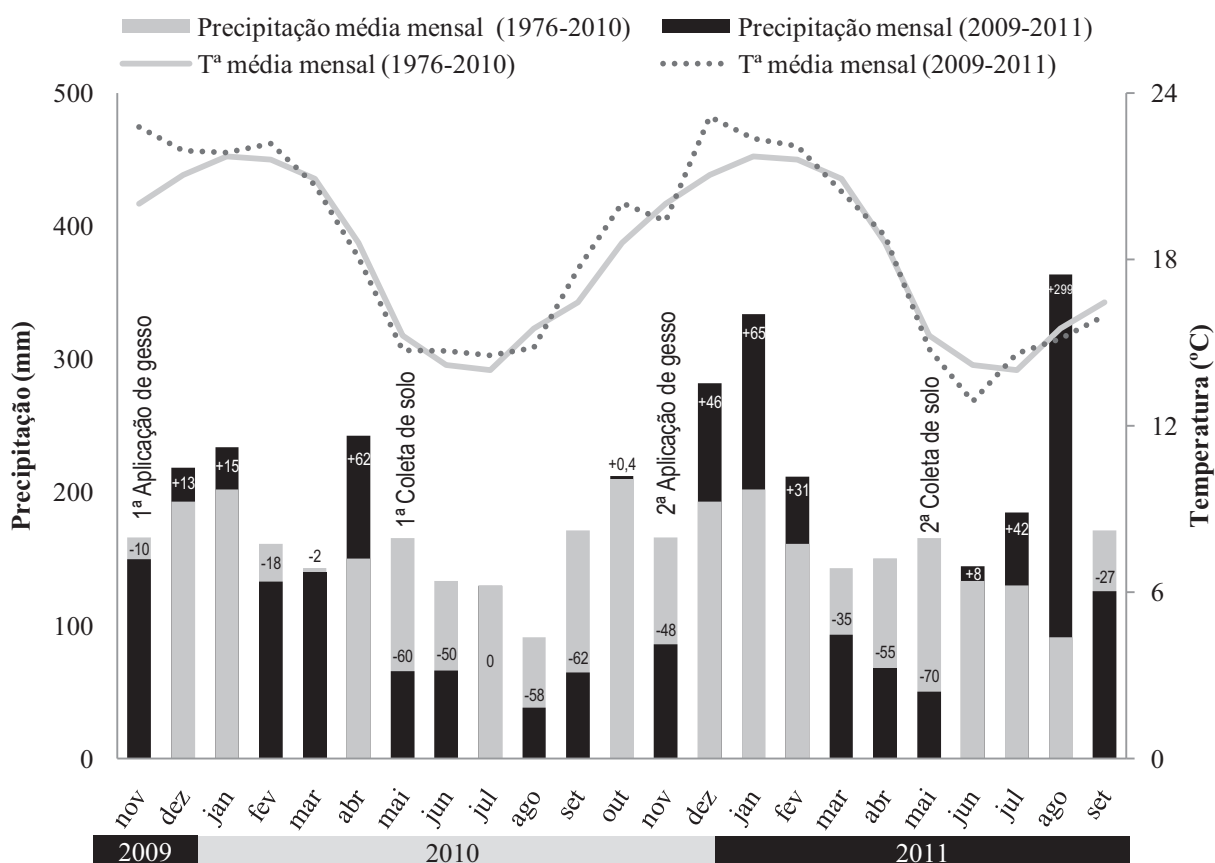


Figura 1. Médias históricas (1976-2010) e observadas (nov/09 a set/11) de precipitação pluvial e temperatura (T^a) em Guarapuava (PR). Valores nas barras indicam o desvio percentual entre as precipitações histórica e observada, durante o período experimental.

O solo foi amostrado aos seis (maio/2010) e 18 meses (maio/2011) após a primeira aplicação do gesso, nas camadas de: 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m e 0,6-0,8 m, nas linhas (quatro subamostras parcela⁻¹) e entrelinhas (oito subamostras parcela⁻¹) das culturas, formando amostras compostas de cada parcela. As análises químicas seguiram a metodologia oficial para o Estado do Paraná (PAVAN et al., 1992), sendo o P extraído por Mehlich I e o S por fosfato de cálcio 0,01 mol l⁻¹ (CANTARELLA; PROCHNOW, 2001).

Na amostragem de 2010, com as doses parceladas do gesso ainda incompletas, foram considerados apenas os resultados dos tratamentos sem parcelamento, sendo submetidos à análise de variância (ANOVA) em DBC e regressão, adotando-se os modelos com o maior nível de significância. Na amostragem de 2011, com o parcelamento completo, todos os resultados foram submetidos à ANOVA (DBC em arranjo fatorial 4x2+1). Havendo interação ($p < 0,05$) entre doses e parcelamento do gesso, procedeu-se análise de regressão em cada nível de parcelamento. Não havendo interação, o efeito do parcelamento foi comparado pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) e procedeu-se a análise de regressão com as médias dos níveis de parcelamento em cada dose, adotando-se os modelos com o maior nível de significância.

3.5. Resultados e Discussão

Na amostragem de 2010, as doses de gesso não afetaram o pH (CaCl_2 0,01 mol l⁻¹) do solo nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m (Figura 2a). O gesso é um sal neutro e não possui propriedades corretivas (RAIJ, 2008), portanto alterações significativas de pH do solo pela sua utilização não são esperadas. Estudos com Latossolos Brunos, em Lajes-SC (ERNANI et al., 1986), e Vermelho, em Ponta Grossa-PR (CAIRES et al., 2004), demonstraram que o uso do gesso não alterou o pH do solo até 0,2 e 0,6 m, respectivamente.

No entanto, houve aumento linear do pH do solo nas camadas de 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m (Figura 2a). Caires et al. (1999) relataram aumento de pH do solo em subsuperfície com a utilização de gesso, atribuindo os resultados à lixiviação e posterior acúmulo de S-SO_4^{2-} em subsuperfície, promovendo troca de ligantes com óxidos hidratados ferro (Fe) e Al. A reação ocorre quando os óxidos hidratados de Fe e Al, que retêm hidroxilas (OH^-), frente a um grande teor de SO_4^{2-} passam a adsorvê-lo, liberando OH^- na solução, o que pode aumentar o pH. No entanto, essa não pode ser considerada uma reação de neutralização, pois é termodinamicamente instável e reversível com a hidrólise do íon SO_4^{2-} (RAIJ, 2008).

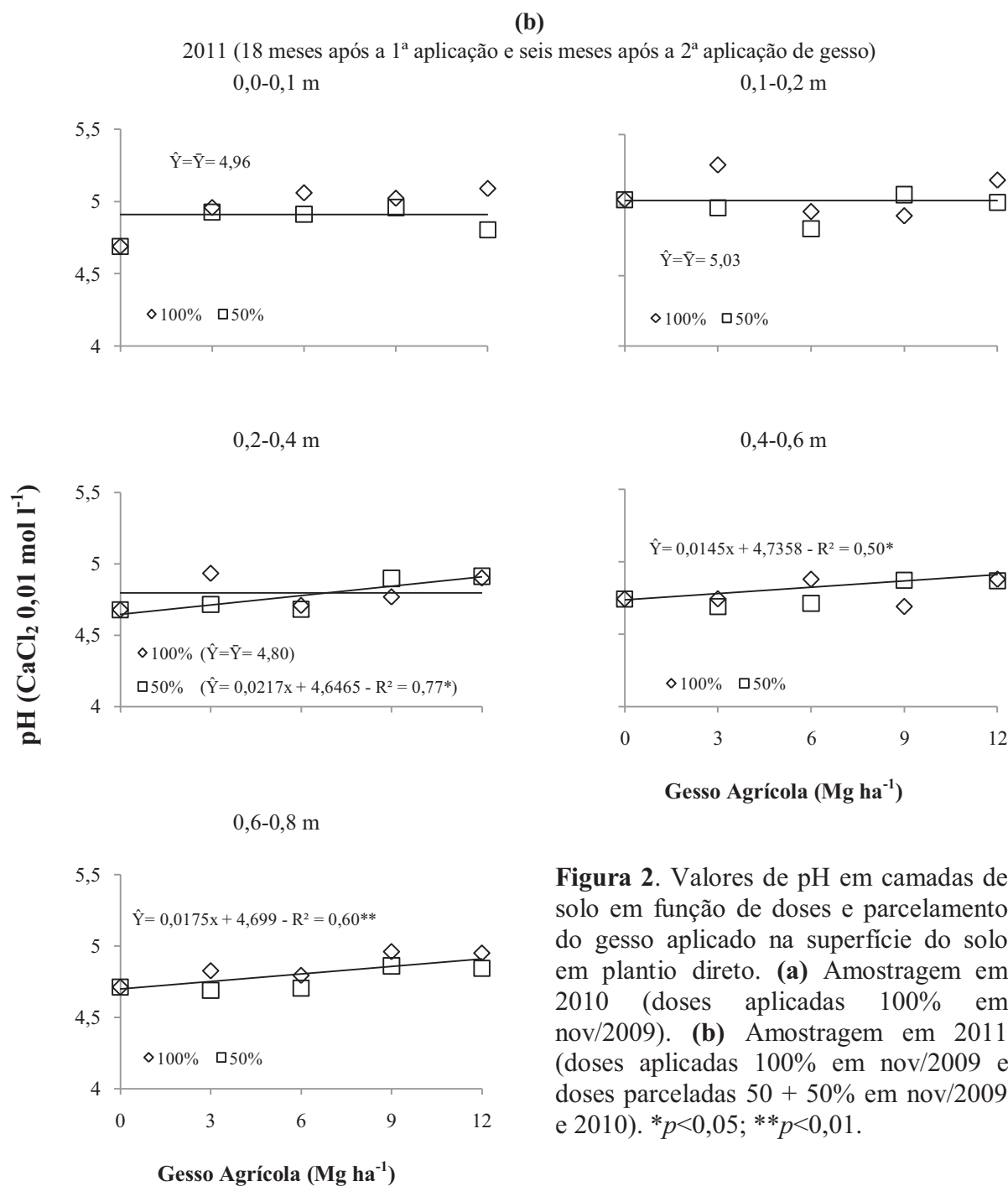
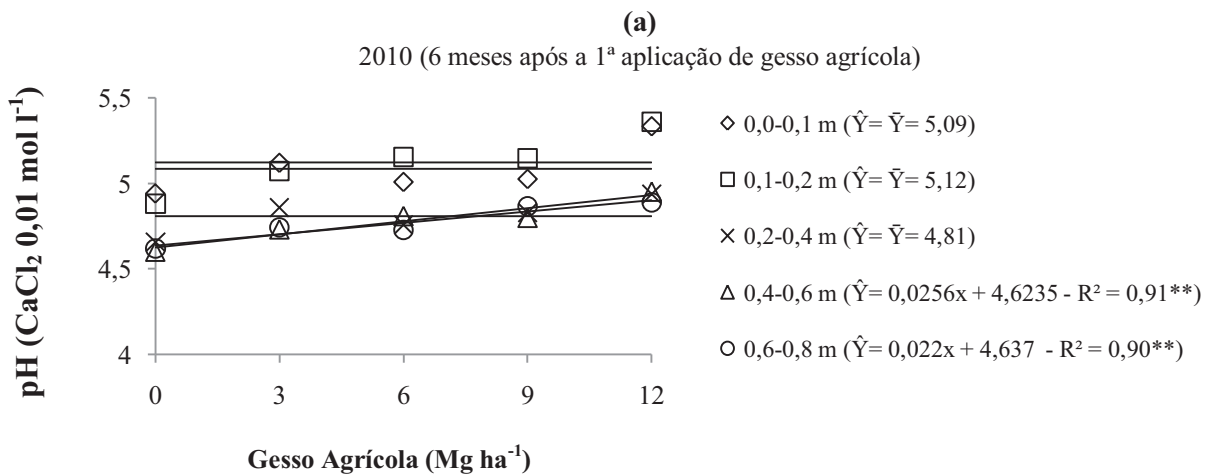


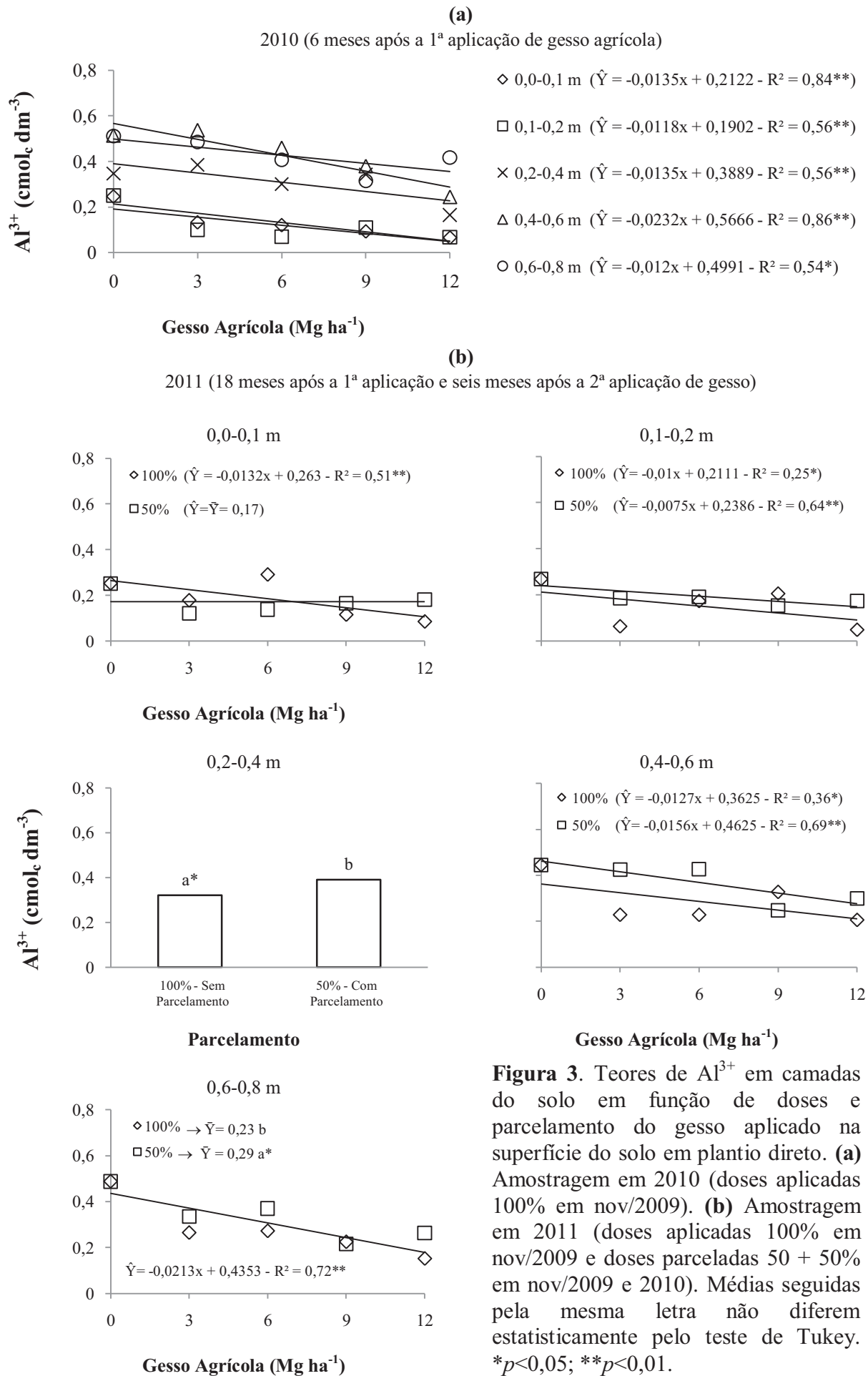
Figura 2. Valores de pH em camadas de solo em função de doses e parcelamento do gesso aplicado na superfície do solo em plantio direto. (a) Amostragem em 2010 (doses aplicadas 100% em nov/2009). (b) Amostragem em 2011 (doses aplicadas 100% em nov/2009 e doses parceladas 50 + 50% em nov/2009 e 2010). * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Na amostragem de 2011, também houve acréscimo linear do pH do solo com as doses de gesso nas camadas de 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m (Figura 2b), sem efeito do parcelamento. Na camada de 0,2-0,4 m, no entanto, houve efeito do parcelamento. As doses sem parcelamento não afetaram o pH do solo, mas as doses parceladas tiveram efeito linear positivo sobre o pH também nesta camada. O efeito das doses, conforme já discutido, se deve ao deslocamento de OH^- da superfície dos óxidos hidratados Fe e Al por íons SO_4^{2-} . Portanto, é possível que o parcelamento das doses em dois anos tenha reduzido a mobilização de S-SO_4^{2-} , mantendo-se maiores teores de S-SO_4^{2-} nesta camada, o que resultaria no aumento do pH.

Para o Al^{3+} , os resultados de 2010 (Figura 3a) mostraram queda linear dos teores com as doses de gesso aplicadas sem parcelamento em todas as camadas. Os resultados de 2011 mostraram que, nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,4-0,6 m, houve interação significativa entre parcelamento e doses de gesso, as quais diminuíram os teores de Al^{3+} , com exceção das doses parceladas na camada de 0,0-0,1 m. Na camada de 0,2-0,4 m houve efeito somente do parcelamento, sendo o teor de Al^{3+} menor sem o parcelamento das doses. Na camada de 0,6-0,8 m, houve efeito linear negativo das doses de gesso sobre os teores de Al^{3+} , e novamente o teor de Al^{3+} foi significativamente menor com as doses aplicadas sem parcelamento.

A diminuição dos teores Al^{3+} com uso de gesso se deve à formação de pares iônicos entre SO_4^{2-} e Al^{3+} ou entre fluoreto (F^-) e Al^{3+} , o qual, segundo Zambrosi et al. (2007), pode ser tão ou mais importante que o S-SO_4^{2-} na complexação do Al^{3+} , mesmo com teor médio (0,63-3,20%) na composição do gesso menor em relação ao SO_4^{2-} (15-16%). Ademais, a troca de ligantes dos óxidos com o S-SO_4^{2-} pode liberar OH^- , o que também pode resultar em neutralização do Al^{3+} (RAIJ, 2008). Nas camadas entre 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m foi possível notar que as doses sem parcelamento foram mais eficientes em diminuir os teores de Al^{3+} do solo. A adição de maiores quantidades de SO_4^{2-} e F^- nas doses sem parcelamento na primeira aplicação, estendeu o efeito às camadas mais profundas em relação às doses parceladas.

As doses de gesso aplicadas sem parcelamento aumentaram linearmente os teores de Ca^{2+} do solo em todas as camadas avaliadas na amostragem de 2010 (Figura 4a). Embora com maior magnitude nas camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m, aos seis meses após a aplicação do gesso foi possível observar acréscimos nos teores de Ca^{2+} até a camada 0,6-0,8 m, confirmando a característica de movimentação do gesso para o subsolo (SUMNER, 1995). Estes resultados concordam com os de Caires et al. (2011b), que também estudaram a aplicação de gesso em Latossolo sob PD em Guarapuava (PR), verificando aumento linear dos teores de Ca^{2+} pela gessagem até a camada de 0,4-0,6 m aos nove meses após a aplicação.



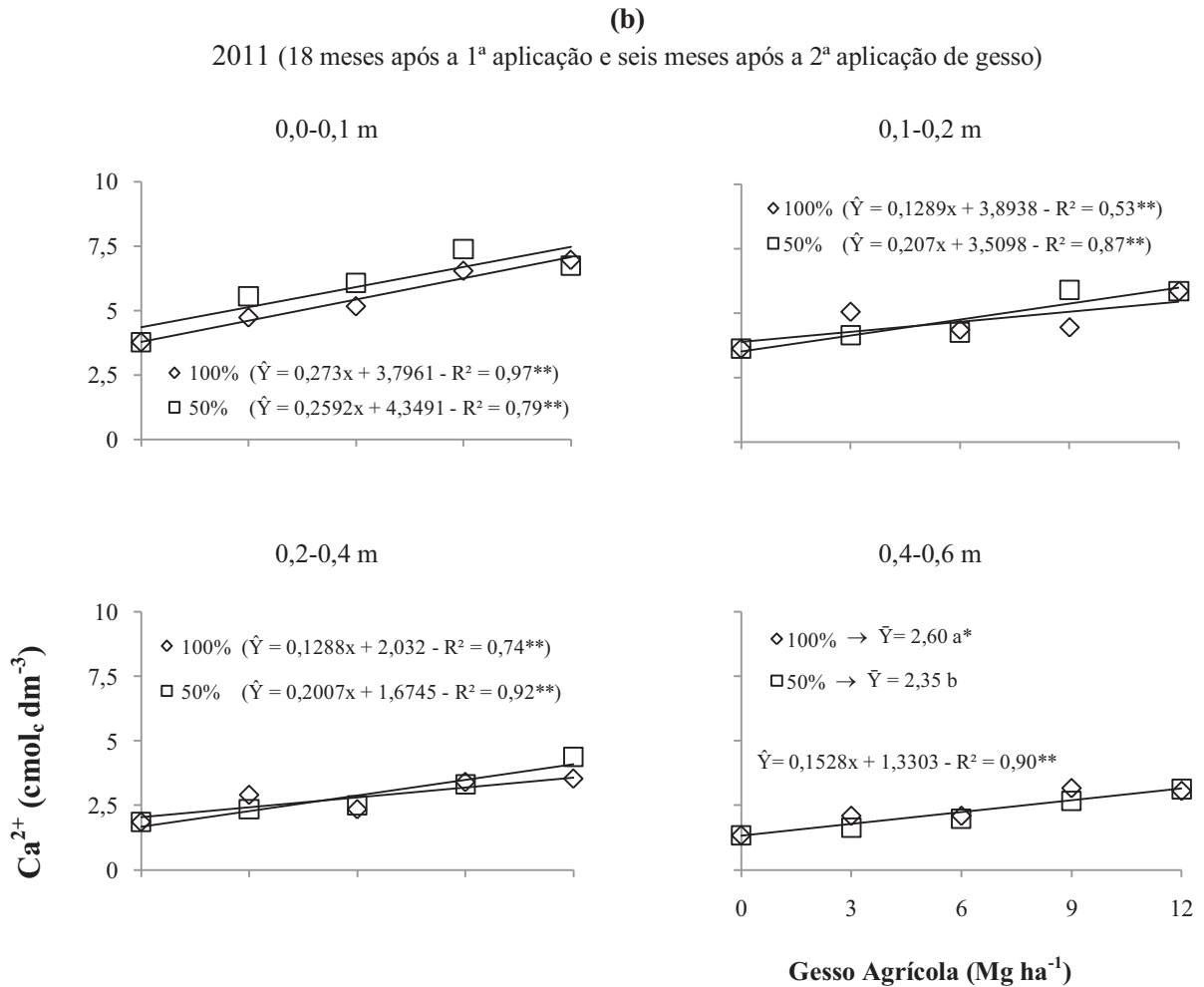
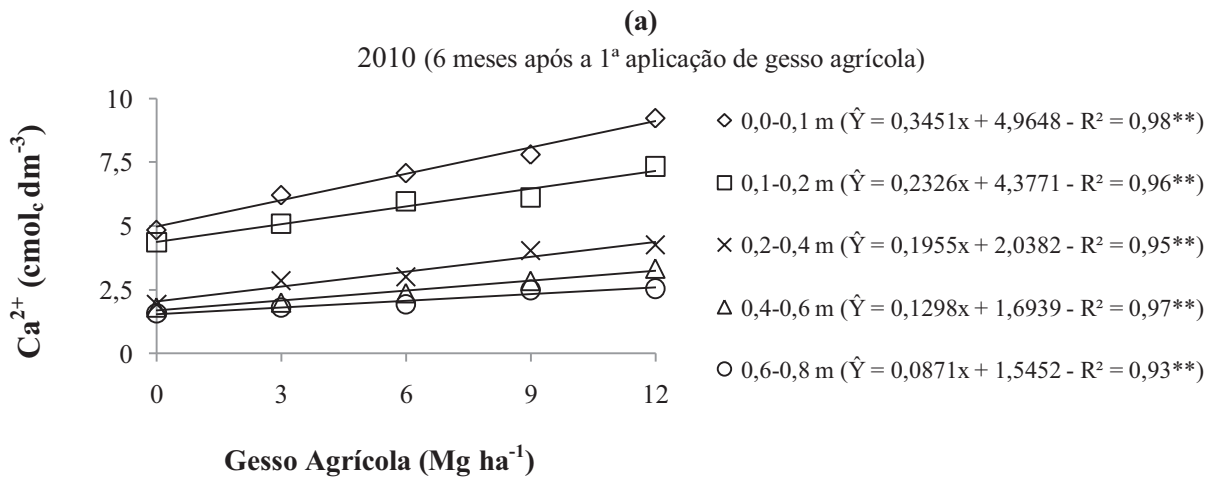


Figura 4. Teores de Ca²⁺ em camadas do solo em função de doses e parcelamento do gesso aplicado na superfície do solo em plantio direto. **(a)** Amostragem em 2010 (doses aplicadas 100% em nov/2009). **(b)** Amostragem em 2011 (doses aplicadas 100% em nov/2009 e doses parceladas 50 + 50% em nov/2009 e 2010). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Em 2011, a amostragem do solo mostrou que, nas camadas até 0,4 m, houve interação significativa entre parcelamento e doses de gesso, as quais resultaram em acréscimos lineares nos teores de Ca^{2+} (Figura 4b). Nas camadas entre 0,4-0,8 m, houve efeitos isolados das doses de gesso, que mantiveram acréscimos lineares nos teores de Ca^{2+} no solo, e dos níveis de parcelamento, sendo os teores de Ca^{2+} significativamente maiores sem o parcelamento das doses. O gesso agrícola possui cerca de 19% de Ca em sua composição (RAIJ, 2008), justificando os acréscimos nos teores de Ca^{2+} no solo, sendo este um importante efeito na melhoria da fertilidade no solo em subsuperfície, com reflexos positivos no enraizamento das culturas (SOUZA; RITCHEY, 1986).

Até a amostragem em 2011, as doses de gesso sem parcelamento, aplicadas em 2009, foram submetidas a 2765 mm de precipitação, enquanto as doses aplicadas em 2010 receberam precipitação total de 1073 mm, justificando efeito mais intenso das doses sem parcelamento sobre os teores de Ca^{2+} em maior profundidade. A mobilidade do CaSO_4^0 e a distribuição do Ca^{2+} no perfil do solo, variam conforme a textura de solo e o regime hídrico sendo mais intensa em solos sob pluviosidade mais elevada (QUAGGIO et al., 1993).

Aplicando gesso em um Latossolo Roxo de Londrina-PR, Pavan et al. (1984) observaram que entre 20-35% do total de Ca^{2+} do solo era composto por CaSO_4 , favorecendo a movimentação de Ca^{2+} ao longo do perfil. Toma et al. (1999) observaram acréscimos significativos nos teores de Ca^{2+} até 1,20 m de profundidade após 16 anos da aplicação de gesso, indicando persistência do CaSO_4 adicionado pelo gesso no perfil do solo.

As doses de gesso sem parcelamento diminuíram linearmente os teores de Mg^{2+} nas camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m na amostragem de 2010 (Figura 5a). O elemento foi redistribuído verticalmente destas camadas, mais intensamente a partir da camada de 0,0-0,1 m, para as camadas de 0,2-0,4, 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m (figura 5a), onde foram observados acréscimos lineares nos teores de Mg^{2+} devido à gessagem.

Em 2011, houve efeito isolado somente das doses de gesso, provocando queda linear dos teores de Mg^{2+} nas camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m (figura 5b). Na camada de 0,2-0,4 m, houve interação entre doses e parcelamento do gesso, mas manteve-se o decréscimo linear nos teores de Mg^{2+} em função da gessagem, sendo que o parcelamento das doses promoveu queda ligeiramente menos intensa nos teores de Mg^{2+} . Esses resultados indicam que a elevação dos teores de Ca^{2+} e SO_4^{2-} no solo com aplicação do gesso deslocou parte do Mg^{2+} ligado às cargas do solo para a solução, onde o mesmo se liga ao S-SO_4^{2-} e, na forma de MgSO_4^0 , pode

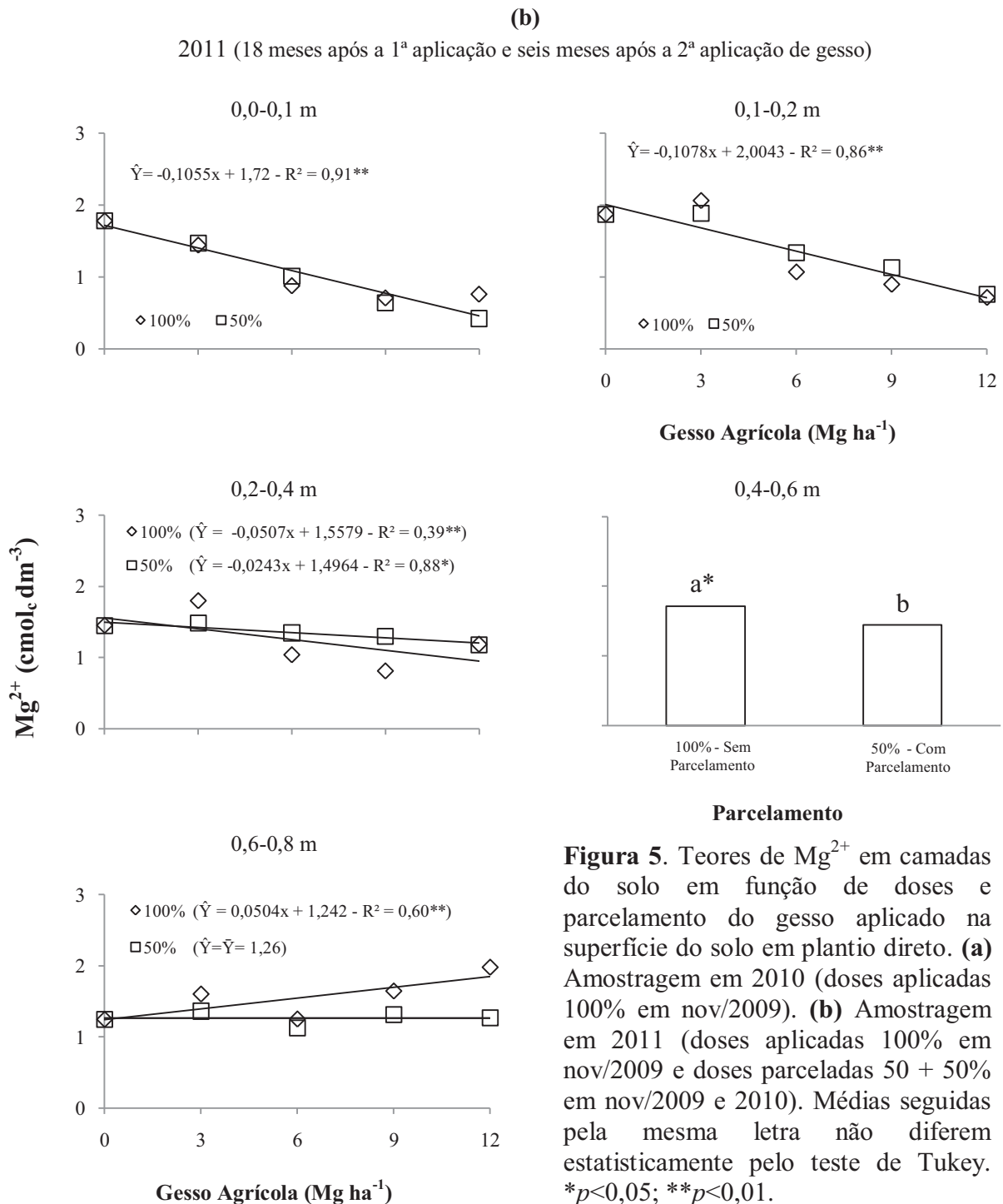
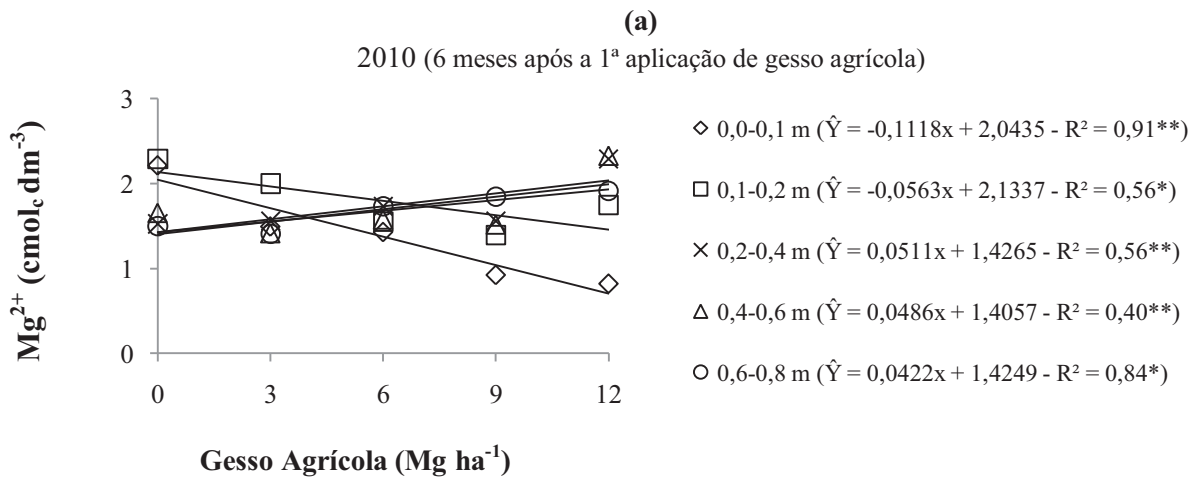


Figura 5. Teores de Mg^{2+} em camadas do solo em função de doses e parcelamento do gesso aplicado na superfície do solo em plantio direto. (a) Amostragem em 2010 (doses aplicadas 100% em nov/2009). (b) Amostragem em 2011 (doses aplicadas 100% em nov/2009 e doses parceladas 50 + 50% em nov/2009 e 2010). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

ser carregado para camadas mais profundas do solo (CAIRES et al., 2011b).

Na camada de 0,4-0,6 m não houve efeito das doses, somente do parcelamento do gesso, sendo o teor de Mg^{2+} estatisticamente superior quando as doses não foram parceladas. Na camada de 0,6-0,8 m, a interação entre fatores mostrou efeitos diferentes das doses de gesso sobre os teores de Mg^{2+} em função do parcelamento. Houve acréscimo linear nos teores de Mg^{2+} no solo com o aumento das doses não parceladas e ausência de resposta em função das doses com o parcelamento. Essa diferença de comportamento indica que houve menor movimentação de Mg^{2+} para as camadas mais profundas do perfil quando as doses de gesso foram parceladas, provavelmente devido à menor precipitação acumulada sobre a segunda parcela das doses, sendo este um efeito benéfico do parcelamento sobre a disponibilidade de Mg^{2+} para as culturas.

As doses de gesso aplicadas sem parcelamento em 2009 também diminuiram linearmente os teores de K^+ nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,4-0,6 m na amostragem de 2010 (Figura 6a). Como discutido para Mg^{2+} , o Ca^{2+} adicionado pelo gesso pode deslocar o K^+ das cargas do solo para a solução, o qual pode ser absorvido pelas plantas e/ou ser carregado para camadas mais profundas do solo ligado ao $S-SO_4^{2-}$ (RAIJ, 2008). A lixiviação de K^+ por uso de gesso não é tão freqüentemente relatada quanto à de Mg^{2+} , pois a ocorrência do par iônico entre K^+ e SO_4^{2-} é menor do que a do par entre Mg^{2+} e SO_4^{2-} (ZAMBROSI et al., 2007), por diferenças na afinidade química e/ou nos teores de K^+ e de Mg^{2+} do solo.

No presente estudo, os decréscimos de 0,007 e 0,006 $cmol_c dm^{-3}$ de K^+ para cada Mg de gesso aplicada, nas camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m, respectivamente, demonstram que a mobilização de K^+ foi de pequena magnitude, o que pode ter levado à não detecção de elevação dos teores de K^+ em camadas subjacentes. Caires et al. (2003) também verificaram quedas de pequena magnitude nos teores de K^+ até 0,4 m após 20 meses da aplicação do gesso, em solo com teores inicialmente altos de K^+ (0,36 $cmol_c dm^{-3}$) até 0,2 m.

Em 2011, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre os teores de K^+ nas camadas de 0,0-0,1, 0,2-0,4, 0,4-0,6 e 0,6-0,8m, indicando baixa persistência do efeito do gesso mobilizando o K^+ do solo. Na camada de 0,1-0,2 m, houve interação entre doses e parcelamento de gesso. As doses aplicadas sem parcelamento não afetaram os teores de K^+ nesta camada, mas as doses parceladas aumentaram linearmente os teores de K^+ , apesar de não ter ocorrido queda significativa nos teores da camada de 0,0-0,1 m (Figura 6b).

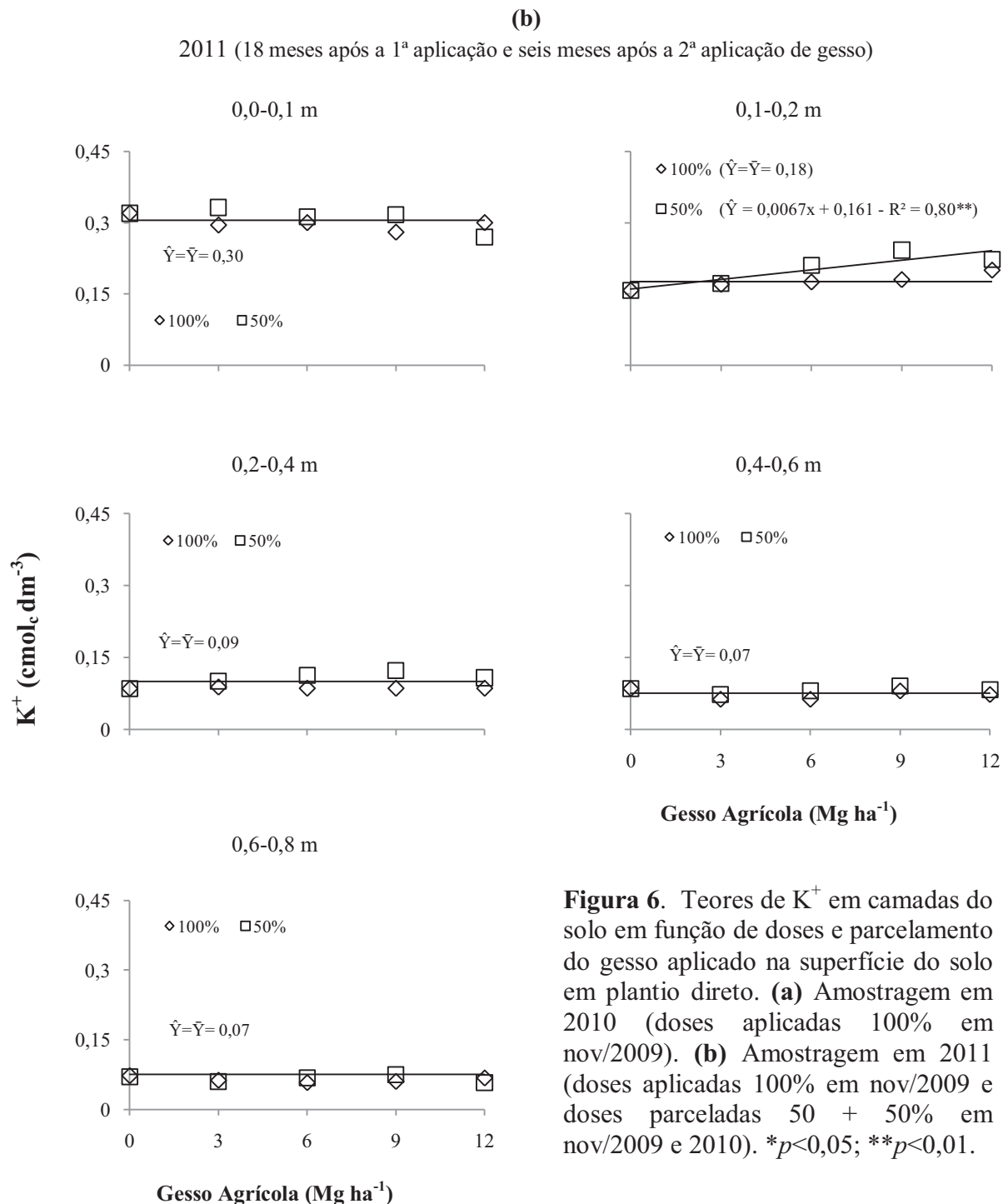
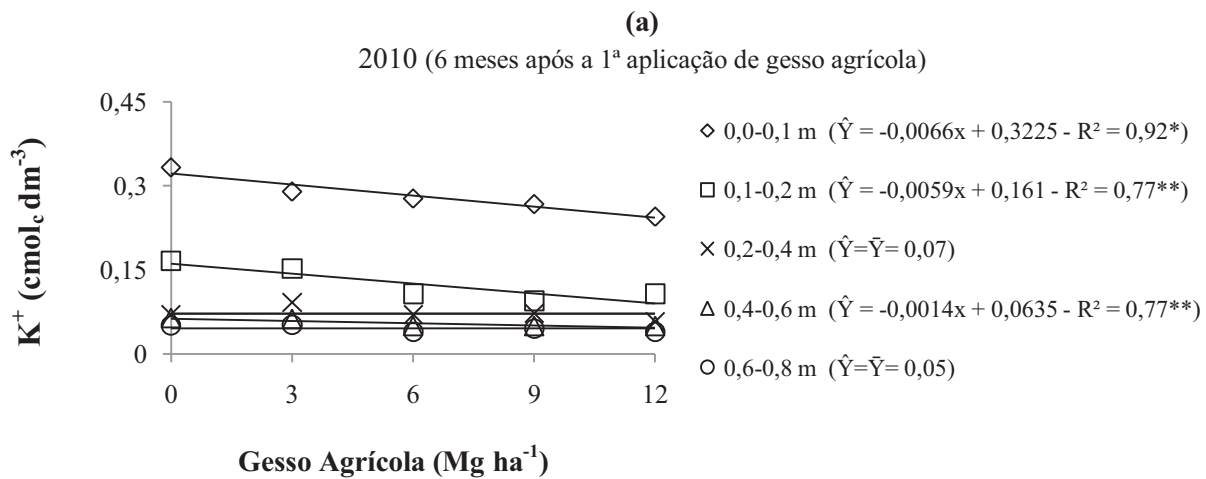


Figura 6. Teores de K^+ em camadas do solo em função de doses e parcelamento do gesso aplicado na superfície do solo em plantio direto. **(a)** Amostragem em 2010 (doses aplicadas 100% em nov/2009). **(b)** Amostragem em 2011 (doses aplicadas 100% em nov/2009 e doses parceladas 50 + 50% em nov/2009 e 2010). * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Acréscimos nos teores de K^+ nas camadas subsuperficiais (0,4-0,8 m), por conta da movimentação a partir da superfície, em função da aplicação de gesso também foram relatadas por Caires et al. (2001; 2002). A diferença de comportamento entre as doses parceladas e não parceladas, no presente estudo, pode ser indicativa da intensidade de mobilização do K^+ . Mesmo sem queda significativa dos teores na camada de 0,0-0,1 m, o parcelamento do gesso pode ter resultado em redistribuição menos intensa do elemento, concentrando-o na camada de 0,1-0,2 m em vez de mobilizá-lo até maiores profundidades.

Na amostragem de 2010, as doses de gesso sem parcelamento elevaram o teor de $S-SO_4^{2-}$ em todas as camadas (Figura 7a), em decorrência do teor de S no gesso agrícola, mínimo de 13% (RAIJ, 2008). Esse efeito também ocorreu em 2011, em todas as camadas, com e sem parcelamento. Porém, as doses com parcelamento afetaram de forma mais pronunciada os teores de $S-SO_4^{2-}$ nas três camadas mais superficiais do solo, entre 0,0 e 0,4 m. Somente na camada mais profunda do perfil (0,6-0,8 m) o aumento nos teores de $S-SO_4^{2-}$ foram mais pronunciados com as doses sem parcelamento.

Segundo Raij (2008), a retenção de $S-SO_4^{2-}$ nas camadas superficiais do solo é baixa, geralmente, sendo o ânion carregado para o subsolo, quando pode transportar quantidade equivalente de cátions consigo. No subsolo, com maior acidez ativa, menores teores de C e P e maior densidade de cargas positivas, há, então, maior retenção de $S-SO_4^{2-}$.

Comparando-se os dados de 2010 e 2011, houve queda nos teores de $S-SO_4^{2-}$ em 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m para as doses sem parcelamento, indicando movimentação de sulfato para o subsolo. Como não houve grande alteração nos teores nas camadas de 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m entre as amostragens, denota-se que a movimentação excedeu, inclusive, a profundidade máxima estudada de 0,8 m.

Segundo Quaggio et al. (1993), a movimentação do $S-SO_4^{2-}$ varia conforme o solo e o regime de precipitação pluvial de cada região, sendo mais lenta em solos mais argilosos e/ou com menor precipitação pluvial. No presente estudo, a precipitação pluvial acumulada entre a aplicação do gesso em 2009 e a amostragem de solo em 2010 foi de 1180 mm, chegando a 2765 mm até a amostragem de 2011.

Caires et al. (1998), estudando doses de gesso em Ponta Grossa-PR, relataram que, aos 28 meses após a adição de 12 Mg ha^{-1} de gesso, do total de $S-SO_4^{2-}$ remanescente no solo 10% estava na camada de 0,0-0,2 m e 90% na camada de 0,2-0,8 m. Toma et al. (1999) observaram teores superiores a 500 mg dm^{-3} de $S-SO_4^{2-}$ na camada de 0,4-1,2 m do solo

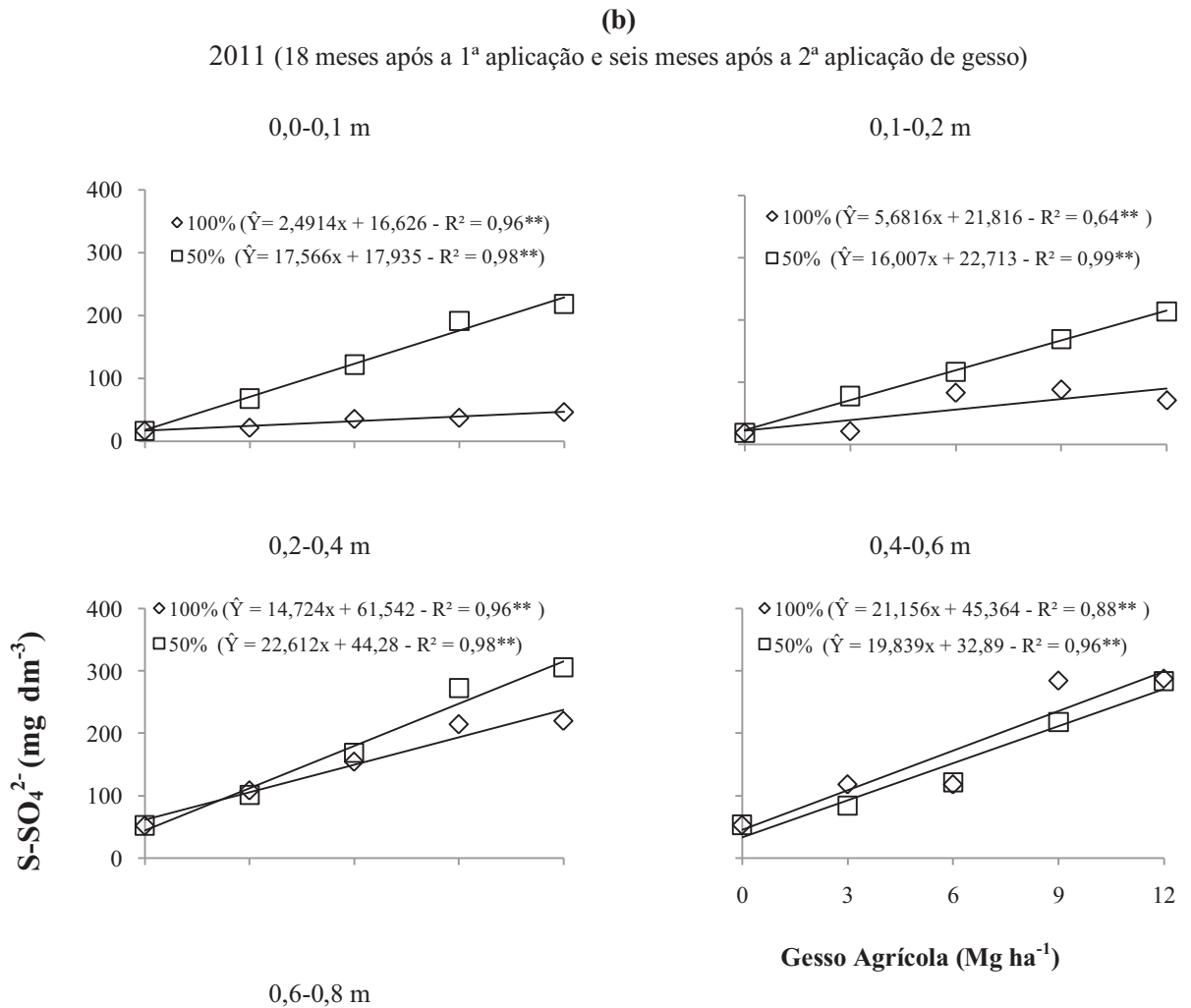
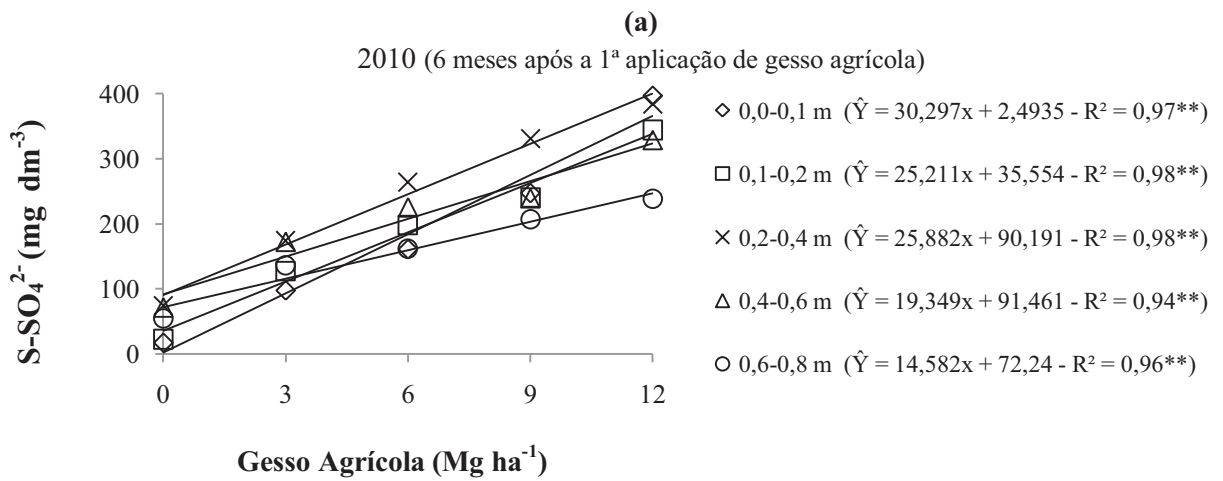


Figura 7. Teores de S-SO₄²⁻ em camadas do solo em função de doses e parcelamento do gesso aplicado na superfície do solo em plantio direto. (a) Amostragem em 2010 (doses aplicadas 100% em nov/2009). (b) Amostragem em 2011 (doses aplicadas 100% em nov/2009 e doses parceladas 50 + 50% em nov/2009 e 2010). ***p*<0,01.

mesmo após 16 anos da aplicação de doses até 35 Mg ha⁻¹ de gesso. Nessa mesma amostragem, os teores de S-SO₄²⁻ encontrados na camada de 0,0-0,2m eram cerca de cinco vezes inferiores aos da camada de 0,4-1,2, indicando menor retenção de S-SO₄²⁻ nas camadas superficiais do solo.

Não houve efeito significativo das doses de gesso sobre o P no solo na coleta de 2010, sendo observados teores médios de 6,41; 3,22; 1,15; 0,52 e 0,88 mg dm⁻³, respectivamente, para as camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m. Contudo, em 2011, observou-se acréscimo linear ($\hat{y} = 0,2049x + 9,9936$; $R^2 = 0,77$; $p < 0,05$) dos teores de P em função do gesso na camada de 0,0-0,1 m, somente para as doses sem parcelamento, indicando que houve fornecimento de P do gesso para o solo. Os teores de P no gesso agrícola (0,2-0,6% de P₂O₅) dependem da eficiência do processo de produção do ácido fosfórico (RAIJ, 2008).

3.6. Conclusões

O gesso causou elevação do pH do subsolo, redução dos teores de Al³⁺ e aumento dos teores de Ca²⁺ e S-SO₄²⁻ no perfil, melhorando a condição geral de fertilidade do solo, embora tenha causado lixiviação de Mg²⁺ e, menos intensamente, de K⁺.

O parcelamento do gesso em dois anos diminuiu a mobilização de Mg²⁺ para camadas entre 0,4-0,8 m, sobretudo nas doses de 9 e 12 Mg ha⁻¹ de gesso, bem como manteve teores mais elevados de S-SO₄²⁻ nas camadas entre 0,0-0,4 m, indicando ser uma estratégia importante quando doses elevadas de gesso forem utilizadas.

4. CAPÍTULO II - NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA SUCESSÃO MILHO-CEVADA-FEIJÃO-TRIGO INFLUENCIADOS POR DOSES E PARCELAMENTO DE GESSO AGRÍCOLA EM PLANTIO DIRETO.

4.1. Resumo - Efeitos de doses e parcelamento de gesso agrícola sobre a nutrição e produtividade de grãos de milho, cevada, feijão e trigo foram avaliados entre 2009 e 2011 em Guarapuava-PR. Os tratamentos consistiram da combinação de quatro doses de gesso agrícola (3, 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹), sem e com parcelamento (50% + 50% - dois anos), mais uma testemunha sem aplicação de gesso. Houve efeito das doses de gesso sobre os teores foliares de N somente no feijão, somente nas doses parceladas de gesso. Quanto ao P, novamente o efeito se restringiu ao feijão, mas sem efeito do parcelamento do gesso. Já os teores foliares de Ca, a relação Ca/Mg e os teores de S aumentaram em todas as culturas com a gessagem, à exceção das doses não parceladas do gesso sobre os teores de S no feijão, havendo efeito positivo do parcelamento sobre o S nas culturas. Por outro lado, as doses de gesso diminuíram os teores foliares de Mg no milho, feijão e trigo, à exceção das doses não parceladas de gesso no trigo. As produtividades de milho, cevada e trigo responderam quadraticamente às doses de gesso, sendo estimadas produtividades máximas com acréscimos de 11%, 10% e 10% em relação à testemunha, respectivamente. Não houve efeito dos tratamentos sobre a produtividade do feijão, e a produtividade acumulada apresentou comportamento também quadrático, com estimativas de produtividade máxima acrescidas em 6,5% e 9,6% em relação à testemunha, nas doses não parceladas e parceladas, respectivamente.

Palavras-Chave: Fosfogesso, cálcio, magnésio, enxofre.

NUTRITION AND YIELD OF MAIZE-BARLEY-BEAN-WHEAT SUCCESSION AFFECTED BY GYPSUM RATES AND SPLITTING APPLICATION UNDER NO- TILL SYSTEM.

4.2. Abstract - Effects of rates and splitting application of gypsum on nutrition and grain yield of maize, barley, bean and wheat were evaluated between 2009-2011 at Guarapuava, Paraná State, Brazil. Treatments consisted of four rates of gypsum (3, 6, 9 and 12 Mg ha⁻¹) without and with splitting (50% + 50% - two years), plus a control without gypsum. Leaf concentrations of N and P for beans were increased by gypsum rates, with positive effect of splitting for N. Leaf concentrations of Ca and S and Ca/Mg ratio were increased in all crops evaluated, with positive effect of splitting on S levels. Leaf concentrations of Mg were decreased on maize, bean and wheat by gypsum rates, with negative effect of splitting on wheat. Maize, barley and wheat grain yields were quadratically affected by gypsum rates, with estimates on the rate of maximum technical efficiency (MTE) 11%, 10% and 10% higher than control treatment, respectively. There was no effect of the treatments for grain yield of bean. The accumulated yield showed quadratical response to gypsum rates, with maximum being estimated with 6,5% and 9,6% increase in relation to control, for non splitted and splitted rates, respectively.

Keywords: Phosphogypsum, calcium, magnesium, sulfur.

4.3. Introdução

O melhoramento genético tem desenvolvido plantas mais produtivas e exigentes quanto às condições do ambiente produtivo. Porém, a correção da acidez do solo, que se limitava à camada de 0,0-0,2 m para cultivos anuais em PC, tornou-se mais limitante quanto à profundidade em PD (ERNANI et al., 2001), sem a incorporação do calcário. Com mais de 60% da área cultivada no Brasil sob PD (MELLO; RAIJ, 2006), acidez do solo corrigida e boa disponibilidade de nutrientes são características de camadas de solo cada vez menos espessas a partir da superfície, ocorrendo limitação ao crescimento subsuperficial de raízes e diminuição da absorção de água e nutrientes, sobretudo em condições de déficit hídrico.

Com isso, tem crescido a busca por opções para melhorar a fertilidade do subsolo sob PD, visando melhorar o enraizamento no perfil, a absorção de água e nutrientes pelas culturas e a estabilidade da produtividade. Na década de 70, pesquisadores observaram que, em situação de déficit hídrico, plantas de milho adubadas com superfosfato triplo (ST) murchavam, enquanto as adubadas com superfosfato simples (SS) não. Constatou-se, então, maior profundidade de raízes nos tratamentos com uso de SS, além de teor maior de Ca^{2+} e menor de Al^{3+} no subsolo. Como a presença de gesso no SS era a principal diferença entre as fontes de P, vislumbrou-se o potencial do gesso para o manejo da fertilidade em subsuperfície (RITCHEY et al., 1980).

No Brasil, os estudos com gesso agrícola se intensificaram a partir da década de 1980, devido a suas características químicas, bem como pelo interesse da indústria de fertilizantes fosfatados em transformá-lo de resíduo em subproduto, já que a produção de gesso pela indústria do ácido fosfórico alcançou aproximadamente 4,8 milhões de toneladas somente no ano 2000 (LYRA SOBRINHO et al., 2001). Os resultados de pesquisa com a aplicação de gesso sobre a produtividade das culturas revelaram-se variáveis sob diferentes tipos de solo, clima e espécie cultivada (RAIJ, 2008). Assim, ainda há dúvidas sobre as condições em que o gesso beneficia a produtividade das culturas e sobre o método de recomendação (CAIRES et al., 2004), sendo importantes os estudos regionais.

Em áreas sob PD no Sul do Brasil, o uso de gesso tem resultado em acréscimos de produtividade, principalmente nas culturas poáceas. O milho tem apresentado importantes incrementos na produtividade com a aplicação de gesso no Paraná, os quais foram constatados tanto na região dos Campos Gerais (Ponta Grossa) quanto no Terceiro Planalto (Guarapuava),

mesmo em solo de alta fertilidade (CAIRES et al., 2011a,b), resultados particularmente importantes para o Estado, maior produtor nacional de milho em 2010 (IBGE-SIDRA, 2010).

As produtividades de trigo e cevada também têm sido afetadas pela gessagem em áreas de PD. Nos Campos Gerais, o aumento na produtividade chegou a 23% com a cevada, efeito intenso associado a déficit hídrico durante a safra (CAIRES et al., 2001), e 420 kg ha⁻¹ de trigo com 8,2 Mg ha⁻¹ gesso – dose de máxima eficiência técnica (CAIRES et al., 2002). Em Guaíra (PR), também sob déficit hídrico, o aumento na produtividade chegou a 350 kg ha⁻¹ de trigo com 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso (RAMPIM et al., 2011).

Considerando que os estados do Sul do Brasil adotam fortemente o PD e são os maiores produtores de cereais de inverno, assim como de milho – no conjunto, denota-se grande potencial de uso do gesso para maximizar a produtividade destas culturas na região. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de doses e parcelamento de gesso agrícola na nutrição e produtividade das culturas de milho, cevada, feijão e trigo em rotação sob PD no Centro-Sul do Paraná.

4.4. Material e Métodos

A caracterização da área do estudo, bem como do delineamento e demais detalhes experimentais foram descritos no capítulo II, página 7. A sucessão de culturas adotada teve a seguinte ordem de implantação: milho em novembro/2009, cevada em julho/2010, feijão em novembro/2010 e trigo em julho/2011.

O milho (Premium Flex[®]) foi semeado com 0,8 m de espaçamento entre linhas, população de 60.000 plantas ha⁻¹ e adubação na linha de semeadura de 350 kg ha⁻¹ do formulado (NPK) 08-28-16. Tanto a cevada (BRS Cauê[®]) como o trigo (O.R Mirante[®]) foram semeadas com 0,17 m de espaçamento entre linhas, população de 250 plantas m⁻² e adubação na linha de semeadura de 250 kg do formulado NPK 08-30-20. O feijão (IPR Tiziu[®]) foi semeado com 0,4 m de espaçamento entre linhas, 22 plantas m⁻² e adubação na linha de semeadura de 250 kg ha⁻¹ do formulado NPK 0-20-20. Quanto à adubação nitrogenada de cobertura, realizada com uréia, o milho recebeu 135 kg ha⁻¹ de N, trigo e cevada receberam 45 kg ha⁻¹ de N cada, e o feijão recebeu 80 kg ha⁻¹ de N, em duas coberturas neste caso, em função da ausência de N na semeadura, a primeira nos primeiros estádios de desenvolvimento e a segunda, então como nas demais culturas, de acordo com as recomendações oficiais.

As amostras de tecido foliar foram colhidas no início do período reprodutivo das culturas, estádios R1 para o milho (RITCHIE e HANWAY, 1989) e R6 para o feijão (ARAUJO et al., 1996). Para trigo e cevada, a coleta foi realizada no estádio 10.5 da escala de Feeks-Large (LARGE, 1954). Na cultura do milho, coletou-se a folha oposta e abaixo da espiga; no feijão, o terceiro trifólio do ápice para a base; no trigo e na cevada coletou-se a folha bandeira (COMISSÃO, 2004). As análises determinaram: P, K, Ca, Mg e S extraídos por digestão nítrico-perclórica, e N extraído por digestão sulfúrica (MALAVOLTA, 1997).

A produtividade foi avaliada no período de maturidade fisiológica das culturas. Para o milho e o feijão, a produtividade foi estimada pela colheita de uma área de 12,8 m² no centro das unidades experimentais. Para as culturas da cevada e trigo, a avaliação da produtividade se deu pela colheita de três repetições de 1 m² em cada unidade experimental, as quais foram utilizadas para calcular a média de produtividade de cada unidade experimental. Os valores de produtividade foram corrigidos para a unidade de 130 g kg⁻¹ e, para o milho, também para estande médio de plantas pelo método da covariância (RAMALHO, 2000).

Na análise dos resultados dos cultivos de milho e cevada, quando as doses parceladas de gesso ainda estavam incompletas, foram considerados apenas os resultados das doses sem parcelamento, submetendo-se os resultados à análise de variância (ANOVA) e regressão, adotando-se os modelos com o maior nível de significância. Na análise dos resultados dos cultivos de feijão e trigo, com o parcelamento já completo, todos os resultados foram submetidos à ANOVA, em arranjo fatorial 4x2+1. Havendo interação ($p < 0,05$) entre doses e parcelamento do gesso, procedeu-se análise de regressão em cada nível de parcelamento. Não havendo interação, o efeito do parcelamento foi comparado pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) e procedeu-se a análise de regressão com as médias dos níveis de parcelamento em cada dose, adotando-se os modelos com o maior nível de significância.

4.5. Resultados e Discussão

As doses de gesso aplicadas sem parcelamento em 2009 não afetaram os teores foliares de N no milho e na cevada (Figura 8a), os quais foram similares em ambas as culturas e mantiveram-se no intervalo de suficiência (27-35 g kg⁻¹ de N para o milho e 17-30 g kg⁻¹ de N para cevada) segundo EMBRAPA (1999). Esses resultados diferem dos obtidos por Caires et al. (2001), que observaram aumento linear no teor foliar de N da cevada, com o uso de até 9

Mg ha⁻¹ de gesso, atribuindo o resultado a uma maior distribuição relativa do sistema radicular em profundidade, melhorando a absorção de N das camadas subsuperficiais do solo.

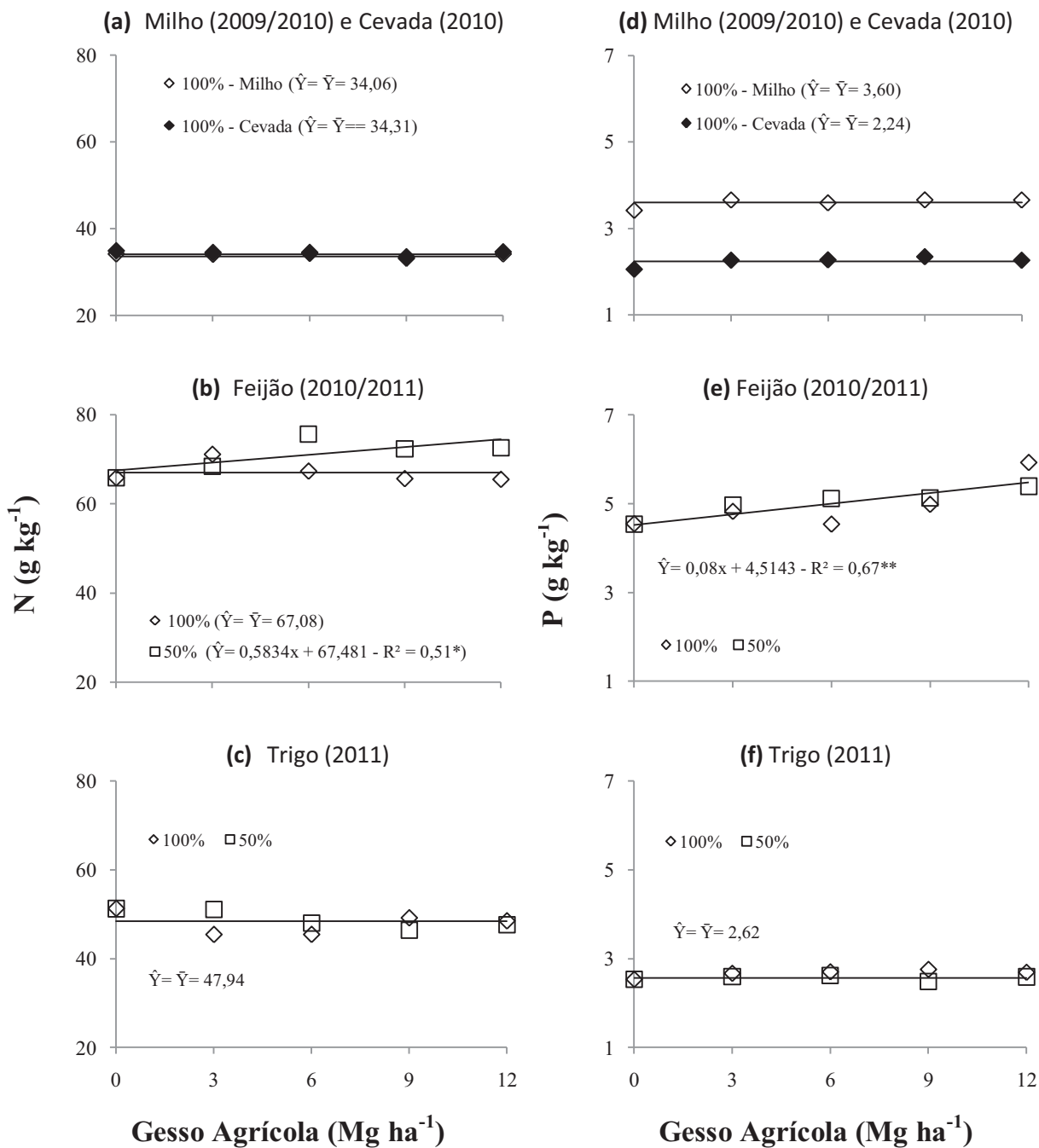


Figura 8. Teores foliares de N e P nas culturas em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto. 100% = doses aplicadas integralmente em novembro/2009; 50% = doses parceladas (50% + 50%) em novembro/2009 e novembro/2010. *: $p < 0,05$ e **: $p < 0,01$.

Para o milho, os resultados do presente trabalho (Figura 8a) concordam com os obtidos por Caires et al. (2011b) também em Guarapuava-PR, não observando efeito da

gessagem sobre o teor foliar de N do milho. Em outro estudo realizado em Ponta Grossa-PR, com doses de até 9 Mg ha⁻¹ de gesso, Caires et al. (2004) concluíram que os acréscimos lineares nos teores foliares de N em milho se deram em função da maior distribuição radicular em profundidade e, conseqüentemente, aumento na absorção de N-NO₃⁻ do subsolo.

No caso do feijão (Figura 8b), primeiro cultivo com o parcelamento já completo, as doses de gesso sem parcelamento não apresentaram efeito sobre os teores foliares de N, concordando com os resultados obtidos por Galon et al. (1996) que aplicaram até 1,5 Mg ha⁻¹ de gesso e não observaram alteração dos teores foliares de N no feijão. As doses de gesso parceladas, contudo, elevaram linearmente os teores foliares de N, demonstrando efeito positivo do parcelamento das doses de gesso sobre a absorção de N pela cultura.

Incremento no teor foliar de N em fabáceas, como feijão e soja, pelo uso de gesso não têm sido freqüentemente observados (GALON et al., 1996; CAIRES et al., 2003), sendo a ocorrência de fixação biológica de N (FBN) apresentada como possível causa. No entanto, por apresentar ciclo mais curto e menor eficiência no processo de FBN do que a soja, o feijoeiro depende mais do N mineral do solo, podendo responder à melhoria química do solo subsuperficial com o gesso apresentando maior absorção de N, sobretudo na forma de NO₃⁻.

Não houve efeito dos tratamentos sobre os teores foliares de N no trigo (Figura 8c), concordando com Caires et al. (2002) que não observaram efeito de doses crescentes de até 9 Mg ha⁻¹ de gesso sobre os teores de N em folhas de trigo em Ponta Grossa-PR.

Houve acréscimo nos teores foliares de P no feijão pela aplicação de doses de gesso, sem efeito do parcelamento (Figura 8e). Galon et al. (1996) observaram maior teor foliar de P no feijão com a aplicação de 1,5 Mg ha⁻¹ de gesso em Latossolo de Jaboticabal-SP. O gesso possui resíduos de P (0,6-0,7% P₂O₅), e segundo Raij (2008), em solos com baixa disponibilidade de P ou quando da aplicação de doses elevadas de gesso, pode haver efeito da gessagem sobre os teores de P no solo e na absorção das culturas. Para as culturas do trigo, cevada e milho, os teores foliares de P não foram afetados pelos tratamentos, sendo estes resultados corroborados por aqueles obtidos por Caires et al. (2001; 2002; 2004).

As doses de gesso aplicadas sem parcelamento elevaram linearmente os teores foliares de Ca na cevada e no milho (Figura 9a), como observado também por Caires et al. (2001; 2004). O gesso possui cerca de 19% de Ca em sua composição (RAIJ, 2008), e acréscimos nos teores do elemento no solo e tecidos das plantas são justificados quando da sua aplicação.

Nas culturas do feijão e trigo (Figura 9b; 9c), as doses de gesso também elevaram os teores foliares de Ca, não sendo observado efeito do parcelamento. A absorção do Ca pelas culturas é geneticamente limitada, ocorrendo somente em regiões meristemáticas das raízes (TISDALE; NELSON, 1985), portanto, espera-se que a dose aplicada tenha maior influência sobre a absorção de Ca que o parcelamento.

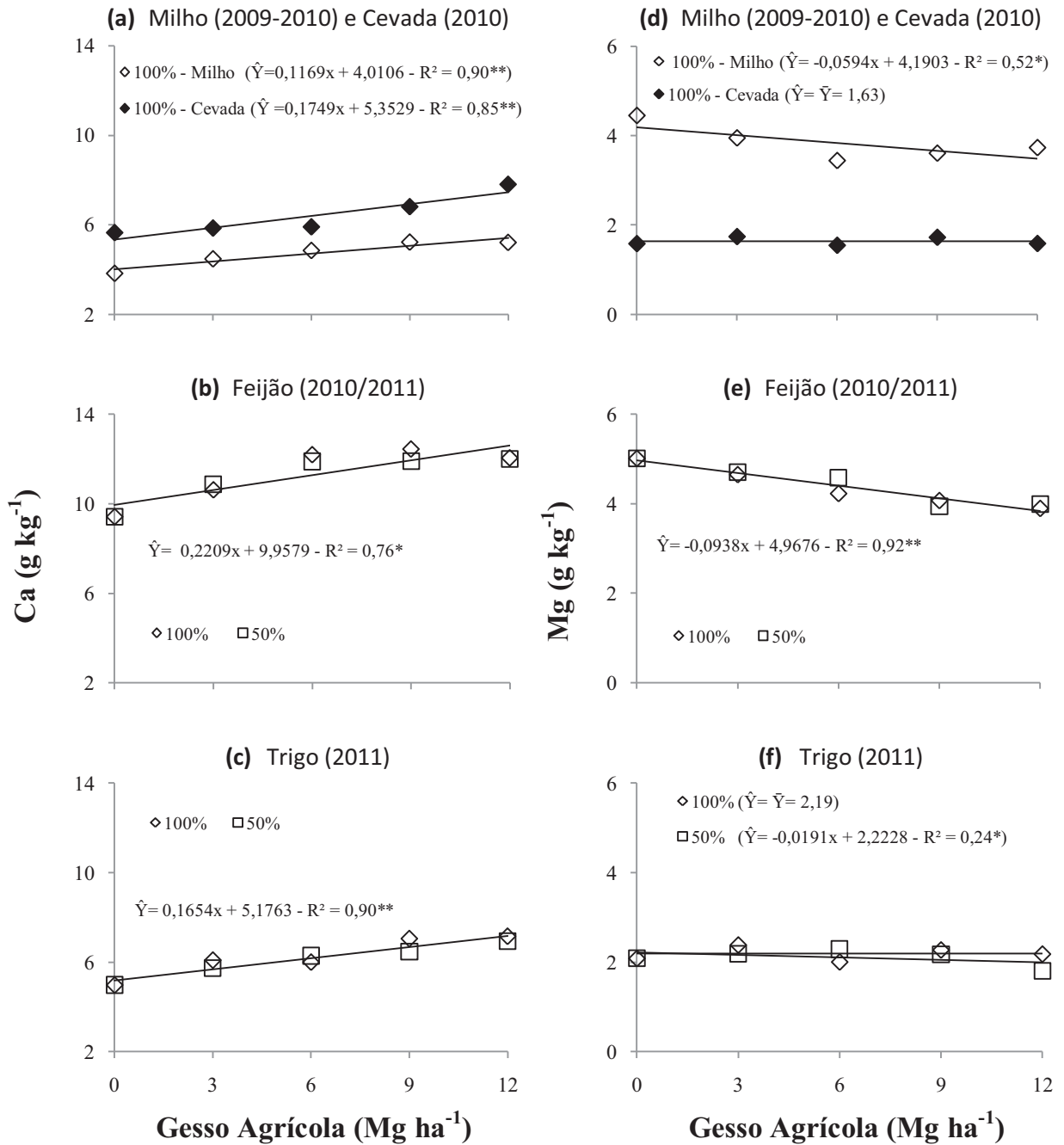


Figura 9. Teores foliares de Ca e Mg das culturas em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto. 100% = doses aplicadas integralmente em novembro/2009; 50% = doses parceladas (50% + 50%) em novembro/2009 e novembro/2010. *: $p < 0,05$ e **: $p < 0,01$.

Houve quedas lineares nos teores foliares de Mg no milho, feijão e trigo em função da aplicação das doses de gesso (Figura 9d; 9e; 9f). A diminuição nos teores foliares de Mg indica que a elevação dos teores de Ca^{2+} no solo dificultou a absorção de Mg^{2+} pelas plantas, o que pode ser explicado, de maneira direta, pela competição existente entre os dois cátions em relação aos sítios de absorção radicular, mas também de forma indireta, pela competição em relação aos sítios de adsorção no solo, o que pode deslocar Mg^{2+} para a solução e mobilizá-lo para o subsolo com o excesso de umidade (MEDEIROS et al., 2008).

Também houve efeito do parcelamento sobre os teores foliares de Mg, mas somente para o trigo cultivado em 2011. Enquanto as doses não parceladas, aplicadas 100% em 2009, não afetaram a absorção de Mg^{2+} do solo, as doses aplicadas parceladas em 2009 (50%) e 2010 (50%) diminuíram os teores foliares de Mg. Esse resultado indica persistência do efeito competição entre Ca e Mg por mais tempo com o parcelamento. Diminuição no teor foliar de Mg no trigo pela aplicação de gesso também foi observada por Rampim et al. (2011), em Latossolo de Guaíra-PR.

No feijão, a diminuição do teor foliar de Mg em função das doses de gesso foi linear e de maior intensidade, sobretudo em comparação ao trigo (Figura 9e;9f). Segundo Caires et al. (1999), as fabáceas, como feijão e soja são mais dependentes do Mg^{2+} das camadas superficiais do solo, com menor absorção de nutrientes do subsolo em relação às poáceas.

Como resultado dos comportamentos conjuntos dos teores foliares de Ca e Mg nas culturas, houve efeito linear crescente das doses de gesso sobre a relação Ca/Mg no tecido foliar de todas as culturas avaliadas (Figura 10), sem efeito do parcelamento.

As doses de gesso promoveram acréscimos lineares nos teores foliares de S em todas as culturas avaliadas (Figura 10e; 10f; 10g), à exceção do feijão com as doses não parceladas, mostrando vantagem do parcelamento do gesso. No trigo, houve, também, efeito maior absorção de S com o parcelamento das doses de gesso, que diminuiu a mobilização de S para o subsolo, mantendo teores maiores de S no perfil por mais tempo, proporcionando maior absorção pelas plantas.

Acréscimos no teor foliar de S nas culturas estão diretamente relacionados ao fornecimento do nutriente pelo gesso, que contém teor mínimo de 13% de S (RAIJ, 2008). Resultados similares foram obtidos por Caires et al. (1999, 2001) com milho e cevada, Rampim et al. (2011) com trigo e Galon et al. (1996) com feijão que, no presente estudo, apresentou os menores teores de S em relação às demais culturas.

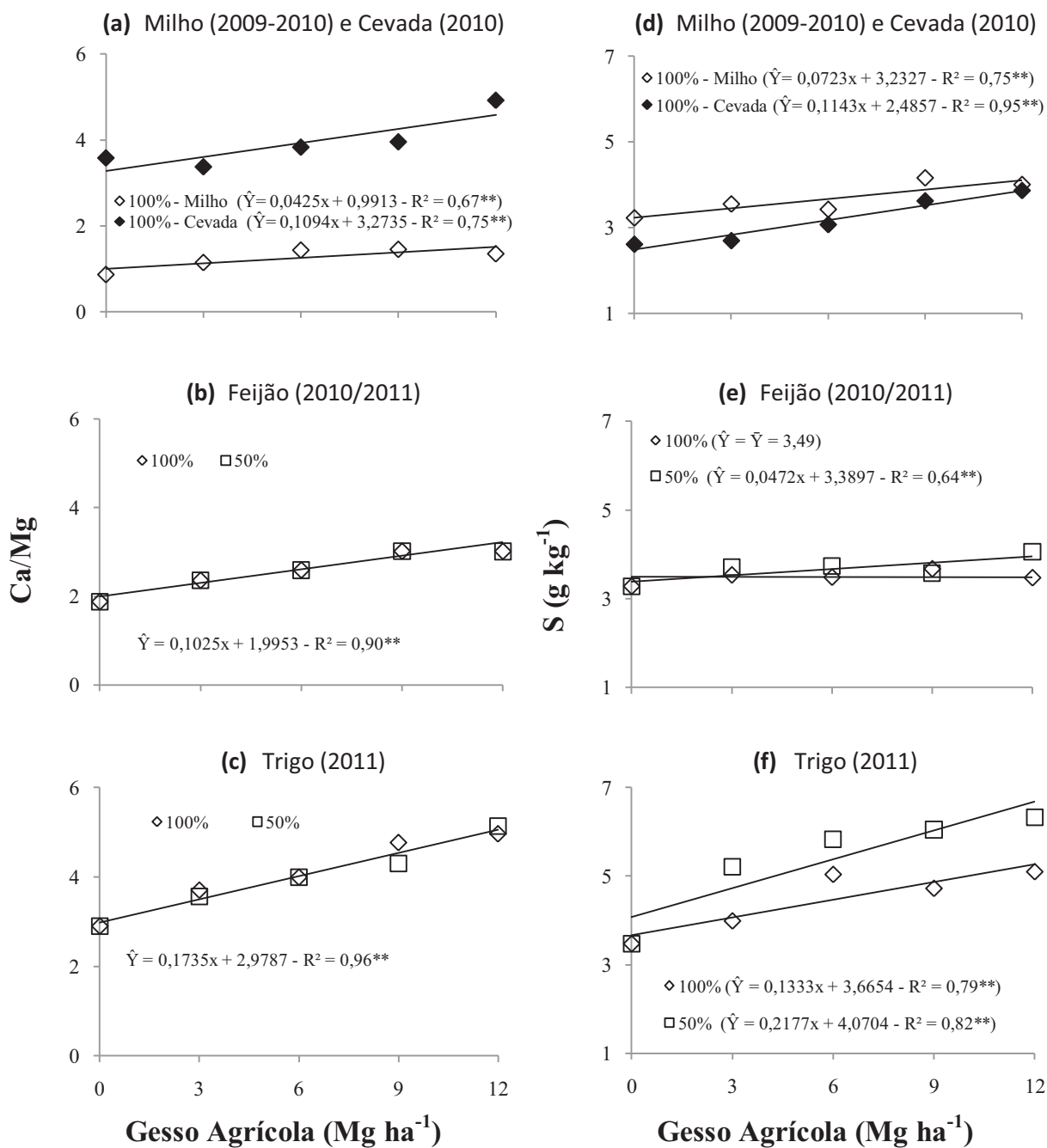


Figura 10. Relação Ca/Mg e teores foliares de S das culturas em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto. 100% = doses aplicadas integralmente em novembro/2009; 50% = doses parceladas (50% + 50%) em novembro/2009 e novembro/2010. **: $p < 0,01$.

A produtividade de grãos de milho respondeu de forma quadrática à adição de doses de gesso (Figura 11). A máxima eficiência técnica (MET) para as doses aplicadas sem parcelamento em 2009 foi estimada em 4,0 Mg ha⁻¹ de gesso, com produtividade estimada de 10,6 Mg ha⁻¹, 11% superior à estimativa para o tratamento controle (0,0 Mg ha⁻¹ de gesso).

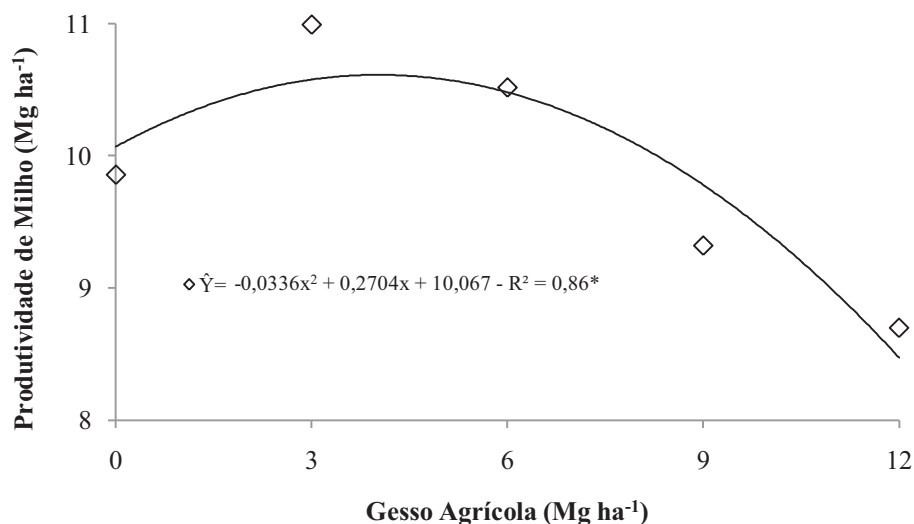


Figura 11. Produtividade de milho na safra 2009-2010 em função de doses de gesso agrícola, aplicadas na superfície em plantio direto. *: $p < 0,05$.

Caires et al. (1999) observaram acréscimo de 11% na produtividade de milho, com dose de MET estimada em $9,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, em Latossolo de textura média em Ponta Grossa-PR. Os autores correlacionaram positivamente os aumentos de produtividade com o aumento dos teores foliares de S-SO_4^{2-} e Ca^{2+} e da relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ no tecido foliar, bem como com a diminuição nos teores de Mg^{2+} . Em outro trabalho em Ponta Grossa, referente às safras 2004/2005 e 2007/2008, Caires et al (2011a) observaram acréscimos lineares na produtividade de milho em função da gessagem. Em um Latossolo Bruno em Guarapuava-PR, os acréscimos na produtividade de milho em função de doses de gesso novamente chegaram a 11%%, mas com MET obtida na dose de $7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ (CAIRES et al., 2011b).

No presente trabalho, a produtividade do milho esteve correlacionada ($p < 0,05$) positivamente com os teores de Mg^{2+} ($r = 0,46$) na camada de 0,0-0,1 m do solo, apresentada no capítulo II. A correlação positiva entre a produtividade e o teor de Mg^{2+} do solo indica que a queda de produtividade da cultura nas doses acima da MET, sobretudo com 9 e 12 Mg ha^{-1} de gesso, foi ocasionada pela movimentação de Mg^{2+} das camadas superficiais para o subsolo, diminuindo a absorção pela cultura e causando decréscimo no teor foliar (figura 9d).

Medeiros et al. (2008) observaram que o aumento excessivo do teor de Ca^{2+} e da relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ no solo, causou diminuição na absorção e nos teores foliares de Mg na cultura do milho, resultando em menor produção de massa seca (MS) e altura de planta.

A produtividade de grãos de cevada mostrou comportamento quadrático em resposta às doses de gesso aplicadas sem parcelamento em 2009 (Figura 12). A dose de MET foi de

6,1 Mg ha⁻¹ de gesso, com produtividade estimada de 4,8 Mg ha⁻¹ de cevada, 10% superior em relação à estimativa para o tratamento controle (0,0 Mg ha⁻¹ de gesso) (Figura 12).

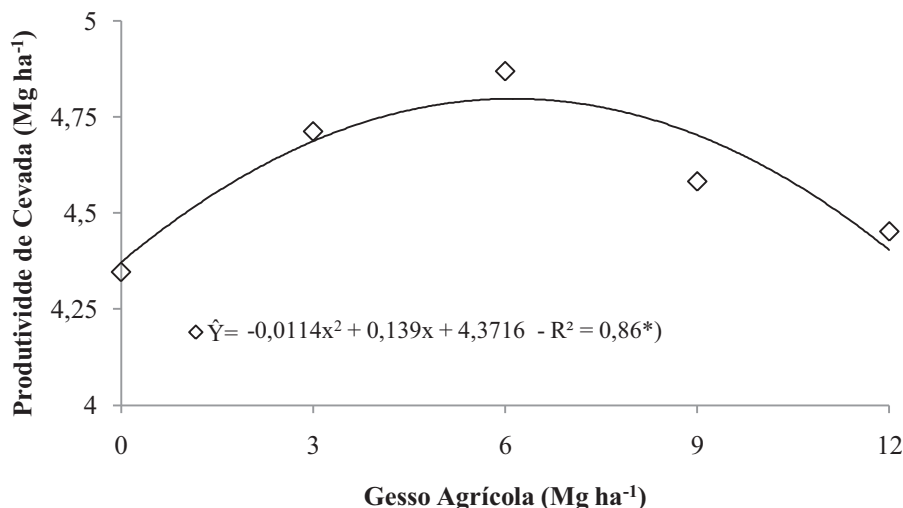


Figura 12. Produtividade de cevada na safra 2010 em função de doses de gesso agrícola aplicadas na superfície em plantio direto. *: $p < 0,05$.

Esses resultados são corroborados por Caires et al. (2001), que relataram aumento de 23% na produtividade de grãos de cevada quando foram aplicadas 9 Mg ha⁻¹ de gesso, em condições de déficit hídrico em Ponta Grossa-PR, atribuindo o acréscimo na produtividade ao aumento nos teores de S-SO₄²⁻ no solo, bem como ao aumento dos teores de S-SO₄²⁻ e Ca²⁺ e da relação Ca²⁺/Mg²⁺ nas folhas. Matula e Pechová (2007) reportaram acréscimo de 15% na produção de MS em plântulas de cevada devido à aplicação de doses de gesso, assim como maior absorção e teores foliares de N.

Cabe ressaltar, que durante o ciclo de desenvolvimento da cevada (julho/2010 – novembro/2010), houve precipitação 33,5% menor que a média histórica para a região (Figura 1, página 8), fato que pode ter contribuído para que a cevada apresentasse resposta (MET) a maiores doses de gesso em comparação ao milho. Em condições de déficit hídrico, as melhorias do ambiente radicular em subsolo, promovidas pela aplicação de gesso, podem promover uma melhor distribuição relativa de raízes no perfil do solo, permitindo à cultura maior absorção de água e nutrientes (CAIRES et al., 2001).

A produtividade de grãos de cevada esteve correlacionada ($p < 0,05$) com os teores foliares de Ca ($r = 0,46$) e S ($r = 0,45$), bem como aos teores de Ca²⁺ ($r = 0,64$) e S-SO₄²⁻ ($r = 0,46$) do solo na camada de 0,0-0,1 m, apresentados no capítulo II. As correlações indicam

que o fornecimento de Ca e S pelo gesso foram benéficos para o acréscimo de produtividade obtido.

A Figura 13 demonstra o efeito positivo da maior disponibilidade de $S-SO_4^{2-}$ na camada de 0-0-0,2 m sobre produtividade de cevada proporcionada pela aplicação do gesso. O teor crítico de $S-SO_4^{2-}$ (extraído por fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol l}^{-1}$) na camada de 0,0-0,2 m para a cevada foi de 38 mg dm^{-3} . Caires et al. (2002) observou teor crítico de $S-SO_4^{2-}$ (extraído em acetato de amônio $0,5 \text{ mol l}^{-1}$ em ácido acético $0,25 \text{ mol l}^{-1}$) de cerca de 26 mg dm^{-3} na camada de 0,0-0,2 para a cultura do trigo, em um Latossolo de Ponta Grossa-PR.

Existem dúvidas sobre os teores adequados de $S-SO_4^{2-}$ no solo para as culturas, e os valores podem apresentar variabilidade em função do extrator utilizado, já que o S encontra-se nas frações orgânica e inorgânica do solo. Fernandes et al. (2007) observaram maior extração, e teores críticos de S mais elevados quando a extração foi realizada com fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol l}^{-1}$ em relação à solução de acetato de amônio $0,5 \text{ mol l}^{-1}$ em ácido acético $0,25 \text{ mol l}^{-1}$, testando-se três solos com teores de argila variando entre 7 e 67%.

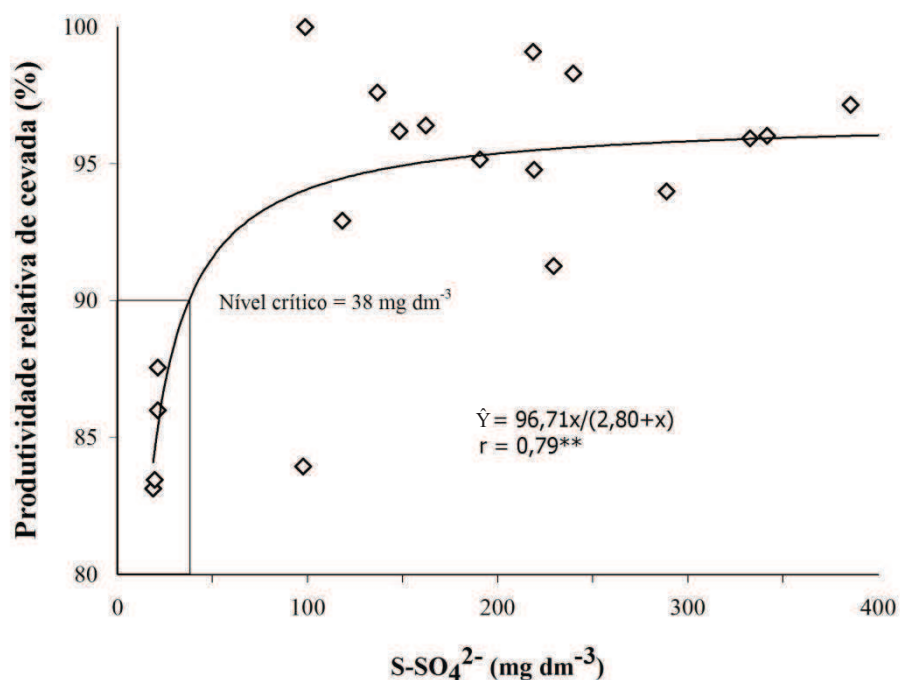


Figura 13. Relação entre produtividade relativa de cevada na safra 2010 e teores de $S-SO_4^{2-}$ (extraído por fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol l}^{-1}$) na camada de 0,0-0,2 m.

Diferentemente de milho e cevada, não houve efeito dos tratamentos sobre a produtividade do feijão (Figura 14). Cabe ressaltar que a ocorrência de precipitação acima da

média histórica, durante a maior parte do ciclo do feijão (Figura 1, página 8), dificultou a condução adequada e o controle de doenças da cultura, que apresentou forte incidência de antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*), limitando a produtividade da cultura.

Resultados similares com o feijão foram obtidos por Galon et al. (1996) que, aplicando até $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso em Latossolo de textura média de Jaboticabal-SP, não observaram acréscimo de produtividade da cultura. Soratto et al. (2010), em experimento com calagem e gessagem, aplicaram $2,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso em um Latossolo Vermelho de Botucatu-SP, também não obtendo efeito sobre a produtividade do feijão. FOLONI et al. (2008), estudando efeitos da aplicação de calcário e gesso na produção de MS de feijão em Presidente Prudente-SP, não observaram efeitos significativos do gesso no feijoeiro.

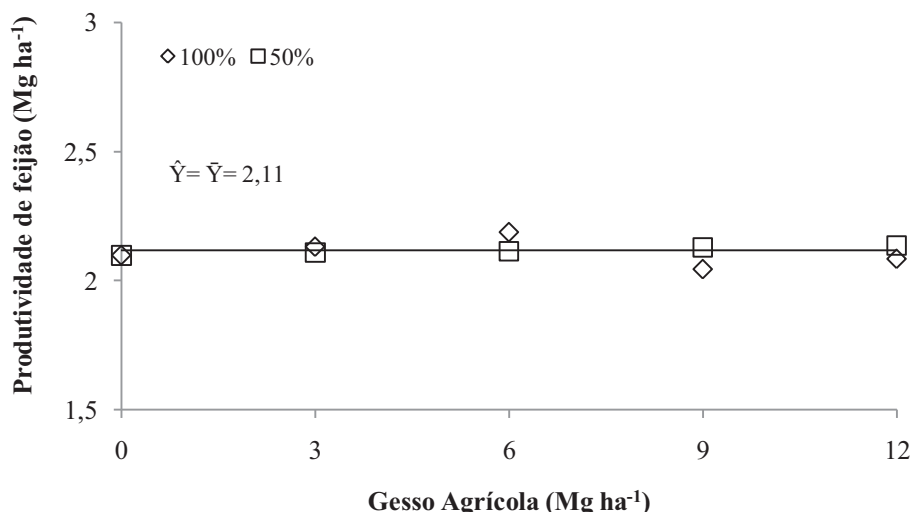


Figura 14. Produtividade de feijão na safra 2010/2011 em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto. 100% = doses aplicadas integralmente em novembro/2009; 50% = doses parceladas (50% + 50%) em novembro/2009 e novembro/2010.

Respostas diferenciadas ao gesso apresentadas por poáceas (gramíneas) e fabáceas (leguminosas) foram observadas em outros trabalhos (CAIRES et al., 1998; RAMPIM et al., 2011 e CAIRES et al., 2011b), sendo discutidas pelos autores as mudanças nos atributos químicos do solo em relação ao fato das poáceas possuírem capacidade de troca de cátions (CTC) radicular inferior em relação às fabáceas. As poáceas são, normalmente, mais eficientes na absorção de cátions monovalentes, e as fabáceas mais eficientes na absorção de cátions divalentes. Dessa maneira, as fabáceas apresentariam menor resposta à adição de gesso devido a sua maior capacidade natural de absorver Ca^{2+} e Mg^{2+} , mesmo em baixas concentrações no solo, quando comparadas às poáceas.

A produtividade do trigo respondeu de forma quadrática à aplicação das doses de gesso (Figura 15), não havendo efeito significativo do parcelamento das doses sobre a cultura, que se desenvolveu em condições normais de precipitação na região (Figura 1, página 8).

A dose de MET foi 5,8 Mg ha⁻¹ de gesso, e produtividade estimada em 4,50 Mg ha⁻¹, 10% superior à testemunha. A produtividade esteve correlacionada ($p < 0,01$) com os teores foliares de S ($r = 0,56$), indicando que, assim como para a cevada, o S fornecido pelo gesso pode ter efeito positivo sobre a produtividade. O nível de produtividade obtido no experimento é considerado alto, pois o maior índice de produtividade de trigo no Paraná na safra de 2010 foi obtido pelo Município de Arapoti, com média de 4,2 Mg ha⁻¹, enquanto a média do município de Guarapuava foi de 3,2 Mg ha⁻¹ (IBGE-SIDRA, 2010).

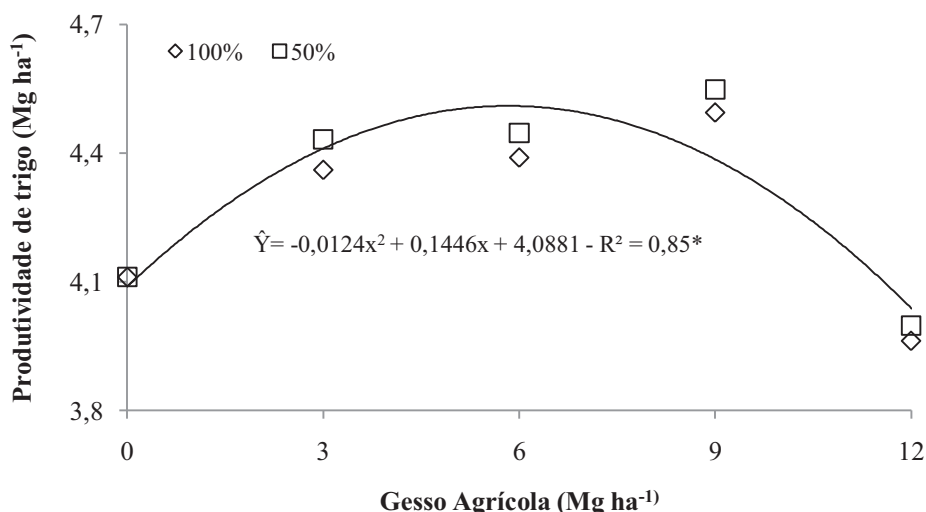


Figura 15. Produtividade de trigo na safra 2011 em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto. 100% = doses aplicadas integralmente em novembro/2009; 50% = doses parceladas (50% + 50%) em novembro/2009 e novembro/2010. *: $p < 0,05$.

Os resultados obtidos com o trigo são corroborados por Caires et al. (2002), que observaram incrementos de cerca de 12% na produtividade de trigo com a aplicação de 8,2 Mg ha⁻¹ de gesso em um Latossolo Vermelho distrófico de Ponta Grossa-PR. O acréscimo de produtividade esteve correlacionado com o aumento nos teores de foliares de S, bem como ao aumento do SO₄²⁻ no solo, promovendo diminuição na atividade do Al³⁺ pela formação de pares iônicos com o SO₄²⁻ proveniente do gesso. Rampim et al. (2011) também observaram acréscimos na produtividade de trigo em função da adição de doses de até 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso, em um Latossolo de Guaíra-PR.

A produtividade acumulada das culturas durante o período experimental também apresentou comportamento quadrático em função das doses de gesso, com ou sem parcelamento (Figura 16).

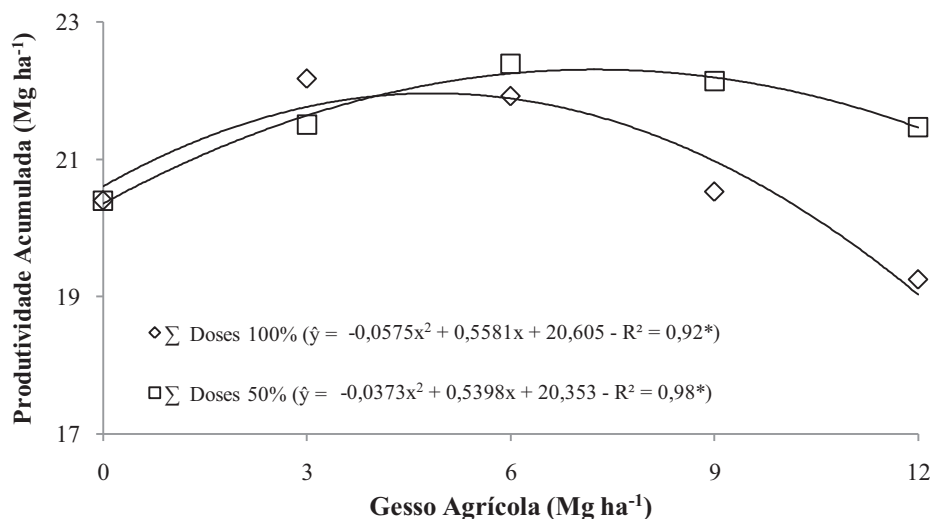


Figura 16. Produtividade acumulada (Σ das produtividades do milho+cevada+feijão+trigo) em função de doses e parcelamento de gesso agrícola, aplicado na superfície em plantio direto. 100% = doses aplicadas integralmente em novembro/2009; 50% = doses parceladas (50% + 50%) em novembro/2009 e novembro/2010. *: $p < 0,05$.

Para as doses aplicadas 100% em 2009, a MET de aplicação foi estimada em 4,8 Mg ha⁻¹ de gesso, com produtividade estimada de 21,9 Mg ha⁻¹, 6,5% superior à testemunha. Entretanto, para as doses parceladas em 2009 e 2010, a MET chegou a 7,2 Mg ha⁻¹ de gesso, com produtividade 22,3 Mg ha⁻¹, 9,6% superior à testemunha.

Com base nos resultados de produtividade acumulada, observa-se que a maior diferença entre os parcelamentos ocorreu com a aplicação das doses de 9 e 12 Mg ha⁻¹ de gesso. Nesse caso, o parcelamento das doses permitiria reduzir as perdas, já que para as mesmas doses sem parcelamento houve redução mais expressiva da produtividade (Figura 16).

4.6. Conclusões

O gesso promoveu acréscimos nos teores foliares de Ca, S e relação Ca/Mg em todas as culturas avaliadas. Os teores foliares de Ca estiveram positivamente correlacionados com a produtividade da cevada, e os teores foliares de S com as produtividades da cevada e trigo,

indicando que o fornecimento desses nutrientes pelo gesso beneficiou a produtividade. O gesso também promoveu elevação dos teores foliares de P no feijão, e queda nos teores de Mg^{2+} no milho, feijão e trigo.

O uso de gesso teve efeito quadrático sobre as produtividades de milho, cevada e trigo, não alterando a produtividade de feijão. A máxima eficiência técnica de aplicação para as culturas em rotação foi obtida com $4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso aplicadas sem parcelamento, ou com $7,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso aplicadas em duas parcelas de 50% em dois anos. O parcelamento das doses evitou perdas mais expressivas de produtividade quando as doses mais elevadas de gesso (9 e 12 Mg ha^{-1}) foram aplicadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alterações de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p.675-702, 2001.
- ARAUJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. de O. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. 786 p.
- 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.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 315-327, 1999.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v.60, p.213-223, 2001.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia agrícola**. vol.59, p. 357-364, 2002.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas no 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.; KUSMAN, M.T.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; PADILHA, J.M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. R. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 125-136, 2004.
- CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, p. 45–53, 2011a.
- CAIRES, E. F.; MASCHIETTO, E. H. G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. W. Surface application of gypsum in low acidic Oxisoil under no-till cropping system. . **Scientia Agrícola**, v. 68, p. 45–53, 2011b.
- CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L.I. Determinação de sulfato em solos. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.;CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A., eds. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, p.225-230, 2001.
- CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A.; MIYAZAWA, M. Redução da acidez subsuperficial em coluna de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, p.469-476, 1988.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed.Evangraf, Porto Alegre, 2004.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Solos. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- ERNANI, P. R. Alterações em algumas características químicas na camada arável do solo pela aplicação de gesso agrícola sobre a superfície de campos nativos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.241-245, 1986.
- 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.
- ESWARAN, H.; REICH, P. F.; BEINROTH, F.H. 1997. Global distribution of soils with acidity. In: **Plant-Soil Interactions at Low pH: Sustainable Agriculture and Forestry Production**. Proceedings of the 4th International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, Minas Gerais, Brazil. p.159–164, 1997.
- FERNANDES, M. B; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C. de. Níveis críticos de enxofre em solos de Pernambuco. **Caatinga**, v.20, n.3, p. 93-103, 2007.
- FOLONI, J. S. S.; SANTOS, D. H.; CRESTE, J. E.; SALVADOR, J. P. Resposta do feijoeiro e fertilidade do solo em função de altas doses de calcário em interação com a gessagem. **Colloquium Agrariae**, v. 4, p. 27-35, 2008.
- GALON, J.A; BELLINGIERI, P.A; ALCARDE, J.C. Efeito de modos e épocas de aplicação de gesso e calcário sobre a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. CARIOCA-80. **Scientia agrícola**, v. 53, p. 119-125, 1996.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. Sistema IBGE de Recuperação automática. **Produção agrícola municipal, 1990-2010**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp>>. Acesso em 08/11/2011.
- IFA, INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. Fertilizantes – Informações Mundiais. 2007. Disponível em: <<http://www.fosfertil.com.br/www/mda/modulo conteudo/reInvestidores/riSobSetor/docs/Fertilizantes%20%20Informa%C3%A7%C3%B5es Mundiais%20%20Atualizado%20em%202008-02-2010.pdf>>. Acesso em: 05/08/2011.
- LARGE, E.C. Growth stages in cereals. Illustration of the Feekes scale. **Plant Pathology**, v.3, p.128-129, 1954.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas – Aspectos agronômicos**. São Paulo: ANDA, 2000. 70p.
- LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: Anda, 2004. 110p.
- LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R.; DANTAS, J. O. C.; DANTAS, J. R. A. Gipsita. In: **Balanço Mineral Brasileiro**, 2001. Brasília: DNPM, 2002. P. 7-23.

MALAVOLTA, E. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MATULA, J.; PECHOVÁ, M. The influence of gypsum treatment on the acquirement of nutrients from soils by barley. **Plant Soil Environment**, v.53, n.2, p. 89–96, 2007.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; DALLA ROSA, J.; GATIBONI, L. C. Calcium: magnesium ratio in amendments of soil acidity: nutrition and initial development of corn plants in a Humic Alic Cambisol. **Semina: Ciências Agrárias**, v.29, p.799-806, 2008.

MELLO, I.; RAIJ, B. van No-till for sustainable agriculture in Brazil. **Proc. World Assoc. Soil and Water Conservancy**, v.1, p.49-57, 2006.

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. de.; ZEMPULSKI, H. da C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina : IAPAR, 1992. 40 p. (IAPAR. Circular 76).

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON. T.A. Update world map of the Köppen Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, p.1633-1644, 2007

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B van.; GALLO, P. B.; MASCARENHAS, H. A. A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.28, p. 375-383, 1993.

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

RAIJ, B van. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo**. São Paulo: ANDA, 1988, 88p.

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

RAMALHO, M. A. P. **A experimentação em genética e melhoramento de plantas**. Lavras: UFLA, 2000, p. 235-245.

RAMPIM, L.; LANA, M do, C.; FRANDOLOSO, J. F.; FONTANIVA, S. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1687-1698, 2011.

RASHID, M.; IQBAL, M. N.; AKRAM, M.; ANSAR, M.; HUSSAIN, R. Role of gypsum in wheat production in rainfed areas. **Soil & Environment**, v.27, p.166-170, 2008.

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

RITCHIE, S.; HANWAY, J. J. **How a corn plant develops**. Special Report No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Ames, Iowa. 1989. Disponível em: <<http://www.biologie.uni-hamburg.de/bonline/artmlibrary/maize/www.ag.iastate.edu/depts/agronomy/cornrows.html#how>>. Acesso em: 03/02/2010.

SILVA, N. M.; RAIJ, B. van.; CARVALHO, L. H.; BATAGLIA, O. C.; KONDO, J. I. Efeitos do calcário e do gesso nas características químicas do solo e na cultura do algodão. **Bragantia**, v.56, p.389-401, 1997.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes pela aveia preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, p.928-935, 2008.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; MELLO, F. F. de. C. Componentes da produção e produtividade de cultivares de arroz e feijão em função de calcário e gesso aplicados na superfície do solo. **Bragantia**, v.69, p.965-974, 2010.

SOUZA, D. M. G.; RITCHEY, K. D. **Uso do Gesso no solo de cerrado**. In: Anais do I Seminário sobre o uso de fosfogesso na agricultura. Brasília, Embrapa-DDT, p.119-144, 1986.

SUMNER, M.E. **Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance**. In: JAYAWARDANE, N.S.; STEWART, B.A., eds. Subsoil management techniques. Athens, GA, Lewis Publishers, 1995. p.147-185.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 3.ed. New York: Macmillan, 1975. 694p.

TOMA, M.; SUMNER, M.; WEEKS, G.; SAIGUSA, M. Long-term Effects of Gypsum on Crop Yield and Subsoil Chemical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 891-895, 1999.

VILELA, L.; RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E. Resposta da soja e do milho ao enxofre num Latossolo vermelho-escuro sob vegetação do cerrado do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.281-285, 1995.

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