

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**MELHORIA DA QUALIDADE QUÍMICA DO PERFIL
DO SOLO COMO ESTRATÉGIA PARA ATENUAR OS
EFEITOS DE DÉFICITS HÍDRICOS SOBRE A
PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE GRÃOS EM
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Douglas Dalla Nora

Santa Maria, RS, Brasil

2014

MELHORIA DA QUALIDADE QUÍMICA DO PERFIL DO SOLO COMO ESTRATÉGIA PARA ATENUAR OS EFEITOS DE DÉFICITS HÍDRICOS SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE GRÃOS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

Douglas Dalla Nora

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos químicos e ciclagem de elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM- RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dalla Nora, Douglas

MELHORIA DA QUALIDADE QUÍMICA DO PERFIL DO SOLO COMO ESTRATÉGIA PARA ATENUAR OS EFEITOS DE DÉFICITS HÍDRICOS SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE GRÃOS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO / Douglas Dalla Nora.-2014.

116 p.; 30cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2014

1. Calagem e Gessagem em Sistema Plantio Direto 2. Processos químicos e ciclarem de elementos 3. Formação da camada de enraizamento quimicamente corrigida 4. Produtividade e desenvolvimento das culturas em Sistema Plantio Direto I. Jorge Carneiro Amado, Telmo II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**MELHORIA DA QUALIDADE QUÍMICA DO PERFIL DO SOLO
COMO ESTRATÉGIA PARA ATENUAR OS EFEITOS DE DÉFICITS
HÍDRICOS SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE GRÃOS
EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**

elaborado por
Douglas Dalla Nora

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:



Telmo Jorge Carneiro Amado
(Presidente/Orientador)



Eduardo Fávero Caires, Dr. (UEPG)



Fernando José Garbuio, Dr. (IFC-Sombrio)

Santa Maria, 10 de Dezembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Roque Dalla Nora e Delonir Dávila e a minha irmã Daniela Dalla Nora pelo apoio ao decorrer dessa caminhada.

Agradeço especialmente a minha namorada Josana Andréia Langner por me apoiar durante a produção da dissertação.

A UFSM, Dpt. de Solos e a Capes por oportunizar e financiar minhas pesquisas.

Ao professor Telmo Jorge Carneiro Amado pelos ensinamentos e oportunidades ao longo da graduação e do mestrado.

A todos os colegas do Laboratório de Uso, Manejo e Conservação do Solo que, de alguma maneira, auxiliaram em minha formação. Agradeço especialmente aos amigos Antônio Mazuco e Eduardo Muller Gruhn por fazerem parte da equipe de pesquisa juntamente a mim.

Vocês fazem parte de minha conquista!

Obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

MELHORIA DA QUALIDADE QUÍMICA DO PERFIL DO SOLO COMO ESTRATÉGIA PARA ATENUAR OS EFEITOS DE DÉFICITS HÍDRICOS SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE GRÃOS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

AUTOR: Douglas Dalla Nora
ORIENTADOR: Telmo Jorge Carneiro Amado
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 10 de dezembro de 2014.

As melhorias químicas proporcionadas pelo uso do sistema plantio direto têm se restringido às camadas superficiais do solo, limitando o desenvolvimento radicular em subsuperfície, e o uso eficiente da água, especialmente em anos com ocorrência de déficit hídrico. O presente estudo teve os seguintes objetivos: I- caracterizar os efeitos do uso isolado do gesso ou combinado com calcário sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas em SPD; II- avaliar o efeito da melhoria química da camada de enraizamento sobre a produtividade das culturas agrícolas em SPD sob condições de déficit hídrico induzido. Foram realizados quatro experimentos em Latossolos distróficos manejados sob SPD de longa duração no Rio Grande do Sul, com distinta qualidade química na camada de enraizamento, no período de 2009 a 2014. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. Dois experimentos foram implantados em 2009 em Carazinho com tratamentos variando de 0,0 a 6,5 Mg ha⁻¹ de gesso. Em um deles, as parcelas foram divididas em duas subparcelas sem e com restrição de 30% da precipitação pluvial pela implantação de câmaras de exclusão. Outros dois experimentos foram implantados em São Miguel das Missões e Tupanciretã em 2011. Em São Miguel das Missões utilizou-se um delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, sendo as parcelas principais compostas por doses de gesso variando de 0,0 a 5,0 Mg ha⁻¹, e as subparcelas compostas pelos tratamentos sem calcário na dose de 2,0 Mg ha⁻¹. Em Tupanciretã, o experimento foi composto por um delineamento fatorial 4x4, com quatro doses de gesso variando de 0,0 a 6,0 Mg ha⁻¹, e quatro doses de calcário variando de 0,0 a 4,8 Mg ha⁻¹. As amostragens de solo foram feitas estratificadamente na camada de 0,00-0,60 m. Verificou-se incremento nos teores de Ca e S em todo o perfil, além de redução na saturação por Al e aumento na saturação por bases e na saturação por Ca ao longo do tempo. Em resposta a melhoria da qualidade química da camada de enraizamento foi verificado aumento da produtividade da soja, milho e trigo. Com a rotação de culturas durante o verão, as camadas amostrais em que houve relação com a produtividade situavam-se em maiores profundidade (camada de 0,25-0,40 m para o Experimento I e de 0,00-0,40 m para o Experimento II). Sem a rotação de culturas no verão as camadas amostrais que apresentaram relação com a produtividade situavam-se mais próximas da superfície (camada de 0,00-0,10 m para o Experimento III e de 0,00-0,25 m para o Experimento IV). Verificou-se aumento na saturação por bases e redução na Saturação por Al em toda a CE em função das doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário. O incremento na quantidade de grãos produzida por mm de chuva, decorrente da aplicação de gesso, foi maior quando houve déficit hídrico durante o período crítico das culturas. A melhoria química da camada de enraizamento do solo proporcionada pela adição de gesso em sistema plantio direto atenuou a perda de produtividade da soja associada à restrição hídrica.

Palavras-chave: Gesso. Calcário. Camada de enraizamento. Restrição hídrica.

ABSTRACT

Master Dissertation
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

IMPROVEMENT CHEMICAL QUALITY OF SOIL PROFILE AS A STRATEGY TO MITIGATE THE EFFECTS OF DROUGHTS ON PRODUCTIVITY OF GRAIN CROPS UNDER NO-TILLAGE

AUTHOR: Douglas Dalla Nora

ADVISOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

Date and Local of the Defense: Santa Maria, december 10th 2014.

The chemical improvements provided by no-till have been restricted to the upper soil layers, limiting root development in the subsurface, and the efficient use of water, especially in years with drought. This study had the aim assess: I- characterize the effects of the isolated use of gypsum or combined with lime on the soil chemical properties and crop grain yield in SPD; II- evaluate the effect of chemical improving layer rooting on the crop yield in SPD under induced water deficit. Four experiments were conducted in Oxisols dystrophic managed under continuous NT in Rio Grande do Sul State, with distinct chemical quality in rooting layer, from 2009 to 2014. The experimental design was randomized block with three replications. Two experiments were established in 2009 in Carazinho with treatments ranging 0.0 to 6.5 Mg ha⁻¹ gypsum. In one experiment the plots were divided into two subplots without restriction and with 30% of the rainfall for the implementation of exclusion chamber. Two other experiments were implanted in São Miguel das Missões and Tupanciretã in 2011. In São Miguel das Missões used a randomized block design with split plots, the main plots with lime rates ranging from 0.0 to 5, 0 Mg ha⁻¹, and the subplots composed by no lime treatment at a dose of 2.0 Mg ha⁻¹. In Tupanciretã, the experiment was comprised of a 4x4 factorial design, with four levels of gypsum ranging from 0.0 to 6.0 Mg ha⁻¹, and four liming levels ranging from 0.0 to 4.8 Mg ha⁻¹. The soil samples were made in the stratified layer of 0.00 to 0.60 m. There was an increase in the Ca and S in the entire profile, and reduce the Al saturation and an increase in basis saturation and the saturation of Ca over time. In response to improving the quality of chemical rooting layer was found increased yield of soybean, corn and wheat. With crop rotation during the summer, the sample layers in which there was related to productivity stood at greater depth (0.25-0.40 m layer for the first experiment and 0.00 to 0.40 m for Experiment II). No crop rotation in summer the sample layers that were associated with productivity were located closer to the surface (layer from 0.00 to 0.10 m for Experiment III and 0.00 to 0.25 m for the experiment IV). An increase in base saturation and reduction in Al saturation throughout the EC with of isolated gypsum rates or combined to lime. The increase in the amount of grain produced per mm of rain, resulting from the application of gypsum, was higher when there was water estress during the critical period of crop. The chemical improvement of soil rooting layer provided by the addition of gypsum attenuated the soybean yield loss associated with water restriction.

Keywords: Gypsum. Lime. Layer rooting. Water stress.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

Figura 1: Precipitação diária e acumulada durante o período experimental para os Experimentos I, II, III e IV, além dos cultivos avaliados nos respectivos Experimentos. Fonte: INMET.....25

Figura 2: Efeito das doses de gesso sobre os teores de cálcio e enxofre no Experimento I após 56 meses (a), no Experimento II após 56 meses (b), no Experimento III após 30 meses (c) e no Experimento IV após 30 meses (d) da aplicação dos tratamentos. [#]Médias dos teores de S e de Ca entre os tratamentos que receberam calcário e os tratamentos que não receberam por conta da interação significativa entre as doses de gesso e calcário; ^{\$}Médias dos teores de S e de Ca para as doses de gesso combinadas a 3,6 Mg ha⁻¹ de calcário por conta da interação entre as doses de gesso e calcário. As barras de erro representam limites de 95% confiança para as medidas.....35

Figura 3: Efeito temporal das doses 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso sobre a saturação por Ca (a), saturação por bases (b) e saturação por Al (c) para o Experimento I. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.....41

Figura 4: Efeito temporal das doses 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso sobre a saturação por Ca (a), saturação por bases (b) e saturação por Al (c) para o Experimento II. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.....42

Figura 5: Efeito temporal das doses 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso sobre a saturação por Ca (a), saturação por bases (b) e saturação por Al (c) para o Experimento III. ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade de erro; Letras iguais nas barras não diferem significativamente a 5% de probabilidade de erro.....44

Figura 6: Efeito temporal das doses 0,0 Mg ha⁻¹ de gesso; 6,0 Mg ha⁻¹ de gesso e 6,0 Mg ha⁻¹ de gesso + 3,6 Mg ha⁻¹ de calcário sobre a saturação por Ca (a), saturação por bases (b) e saturação por Al (c) para o Experimento IV. ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade de erro; Letras iguais nas barras não diferem significativamente a 5% de probabilidade de erro.....46

Figura 7: Produtividade da soja, milho e trigo para o Experimento I (a), Experimento II (b), Experimento III (c) e Experimento IV (d) em relação às doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.....51

Figura 8: Relação entre a produtividade relativa de soja (a), trigo (b) e milho (c) para todos experimentos em conjunto com as doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário e tempo de avaliação. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro. Letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....55

Figura 9: Relação entre a produtividade relativa de soja e trigo e a saturação por bases e a saturação por Al na camada de 0,00-0,10 m para o Experimento III (a); entre a produtividade

relativa de soja e trigo e a saturação por bases e a saturação por Al na camada de 0,00-0,25 m para o Experimento IV; entre a produtividade relativa de soja, milho e trigo com a saturação por bases e a saturação por Al na camada de 0,25-0,40 m para o Experimento I (c); entre a produtividade relativa de soja, milho e trigo e a saturação por bases e a saturação por Al na camada de 0,00-0,40 m para o Experimento II (d). Para as profundidades que não foram amostradas, foi realizada a média ponderada das camadas que a compõe.....58

ARTIGO II

Figura 1: Precipitação pluvial diária e acumulada durante o período experimental para os Experimentos I, II, III e IV, situados em Carazinho, Carazinho, São Miguel das Missões e Tupãnciretã, respectivamente. Além dos cultivos e amostragens de solo e planta realizados nos respectivos Experimentos. Fonte: INMET.....70

Figura 2: Precipitação pluvial total, normal e ideal durante o ciclo e o período crítico das culturas nos Experimentos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Fonte: INMET.....86

Figura 3: Relação entre a quantidade de grãos de milho produzida (kg) por mm precipitado durante o ciclo (a) e por mm precipitado durante o período crítico (b) com as doses de gesso aplicadas nos Experimentos I e II. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.....88

Figura 4: Relação entre a quantidade de grãos de trigo produzida (kg) por mm precipitado durante o ciclo (a) e durante o período crítico (b) com as doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário nos Experimentos I, II, III e IV. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.....90

Figura 5: Relação entre a quantidade grãos de soja produzida (kg) por mm precipitado durante o ciclo (a); e por mm precipitado durante o ciclo (b); relação entre kg de grãos de soja por mm precipitado durante o período crítico (c) por mm precipitado durante o período crítico (d) com as doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário nos Experimentos I, II, III e IV. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.....92

Figura 6: Saturação por bases e saturação por alumínio aos 32 meses (a) e aos 56 meses (b) após a implantação dos tratamentos no Experimento I. As épocas de coleta são referentes ao período da instalação das câmaras de exclusão da precipitação. Diferença mínima estatística (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro..94

Figura 7: Produtividade da soja na safra de 2011/12 com exclusão de 30% ou 120 mm da precipitação e sem exclusão da precipitação 32 meses após a aplicação das doses de 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso (a); produtividade da soja com exclusão de 30% ou 231 mm da precipitação e sem exclusão da precipitação 54 meses após a aplicação das doses de 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso (b)..96

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I

Tabela 1. Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude e precipitação pluvial anual.....24

Tabela 2. Atributos químicos dos solos avaliados antes da implantação dos tratamentos nas quatro áreas experimentais no RS.....28

Tabela 3: Produtividade acumulada de seis safras para o Experimento I, cinco safras para o Experimento II, quatro safras para o Experimento III e duas safras para o Experimento IV.....53

ARTIGO II

Tabela 1: Sequência de cultivos realizados nos Experimentos I, II, III e IV, além do ciclo das culturas, adubação utilizada e época da avaliação da produtividade.....72

Tabela 2. Atributos químicos dos solos avaliados antes da implantação dos tratamentos nas quatro áreas experimentais no RS.....73

Tabela 3: Regressão entre saturação por bases e saturação por alumínio (Sat. por Al) com as doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário para o Experimento I e Experimento II após 56 meses da aplicação dos tratamentos e para o Experimento III e Experimento IV após 30 meses da aplicação dos tratamentos.....84

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Câmaras de exclusão de 30% da precipitação instaladas sobre os tratamentos de 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha ⁻¹ de gesso aos 32 e 54 meses após aplicação dos tratamentos sobre a cultura da soja no Experimento I.....	109
--	-----

LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice A – Análise de variância dos atributos químicos do solo em relação aos tratamentos, profundidade e tempo de amostragem para os quatro Experimentos de estudo.....111
- Apêndice B – Análise de variância entre os tratamentos e produtividade das culturas para os quatro Experimentos de estudo.....112
- Apêndice C – Efeito dos Tratamentos sobre os teores de magnésio e potássio para a última coleta realizada em cada Experimento.....113
- Apêndice D – Efeito dos Tratamentos sobre as relações Ca/Mg e (Ca + Mg)/K para a última coleta realizada em cada Experimento.....114
- Apêndice E – Efeito dos Tratamentos sobre a saturação por Ca, saturação por Mg e saturação por K para a última coleta realizada em cada Experimento.....115

Lista de Abreviações

Al	– Alumínio
Ca	– Cálcio
CQFS-RS/SC	– Comissão de Química e Fertilidade do Solo
CTC	– Capacidade de Troca de Cátions
F	– Fluor
Mg	– Magnésio
N	– Nitrogênio
PRNT	– Poder Real de Neutralização do Total
K	– Potássio
P	– Fósforo
PR	– Produtividade Relativa
RS	– Rio Grande do Sul
Sat. por Al	– Saturação por Alumínio
Sat. por Ca	–Saturação por Cálcio
S	– Enxofre
SO ₄ ²⁻	– Sulfato
SPD	– Sistema Plantio Direto

SUMÁRIO

14. INTRODUÇÃO GERAL	14
2. HIPÓTESES	19
3. ARTIGO I - PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS AFETADAS PELA MELHORIA QUÍMICA DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO EM SPD	20
3.1. Resumo	20
3.2. Introdução	21
3.3. Material e Métodos	23
3.3.1. Descrição das áreas de estudo	23
3.3.2. Delineamento experimental	28
3.3.3. Descrição das principais avaliações	29
3.3.4. Análise estatística.....	30
3.4. Resultados e Discussão	31
3.4.1. Caracterização dos atributos químicos do solo na implantação dos experimentos	31
3.4.2. Alterações nos atributos químicos do solo da CE após a aplicação da calagem e gessagem	34
3.4.3. Melhoria temporal dos atributos químicos do solo na camada de enraizamento	39
3.4.4. Efeito da qualidade química da camada de enraizamento sobre a produtividade de culturas de grãos	46
3.4.5. Relações com a produtividade.....	54
3.5. Conclusões	59
3.6. Referências Bibliográficas	59
4. ARTIGO II - MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DE DÉFICITS HÍDRICOS DE CURTA DURAÇÃO PELA MELHORIA QUÍMICA DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO	65
4.1. Resumo	65
4.2. Introdução	66
4.3. Material e Métodos	68
4.3.1. Descrição das áreas de estudo	68
4.3.2. Delineamento experimental	74
4.3.3. Descrição das principais avaliações temporais realizada nas áreas experimentais	74
4.3.4. Avaliação da exclusão parcial da precipitação	75
4.3.5. Determinação da precipitação real, normal e ideal para as culturas de grãos.....	76
4.3.6. Análise estatística.....	77
4.4. Resultados e Discussão	77
4.4.1. Caracterização dos atributos químicos do solo anteriormente à aplicação dos tratamentos nos quatro Experimentos investigados	77
4.4.2. Variabilidade pluviométrica durante o ciclo das culturas.....	79
4.4.3. Atributos químicos do solo afetados pela aplicação dos tratamentos	80
4.4.4. Regime da precipitação e seu efeito na produtividade com a melhoria química do perfil do solo	85
4.4.5. Efeito da melhoria química do solo em mitigar o déficit hídrico induzido.....	92
4.5. Conclusões	96
4.6. Referências bibliográficas	97
5. considerações finais	103
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
7. ANEXOS	108
8. APÊNDICES	110

1. INTRODUÇÃO GERAL

A partir da adoção do sistema plantio direto (SPD) seguindo os princípios de elevada cobertura do solo, mínima mobilização e rotação de culturas, melhorias na qualidade química, biológica e física do solo vêm sendo observadas nas áreas agrícolas de diferentes Estados do Brasil (ANJOS et al., 2012; DALLA NORA et al., 2014a). Aliado ao SPD, a utilização de cultivares mais precoces e produtivas e o maior uso de fertilizantes e corretivos têm proporcionado a obtenção de produtividades cada vez mais elevadas das culturas de grãos (AMADO et al., 2009). Os resultados positivos obtidos sob SPD, aliado a economia de tempo, diesel, mão de obra, têm resultado em rápida expansão do sistema que alcançou na última safra área próxima a 27 milhões de hectares (CAIRES, 2013). A maior parte desta área de SPD encontra-se sob Latossolos ácidos.

Com o elevado aporte e a manutenção de resíduos vegetais há um gradual aumento no conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS), notadamente na camada mais próxima da superfície (BAYER et al., 2011). Nesse contexto, os ácidos orgânicos simples e os ácidos fúlvicos, complexam parcialmente o alumínio (Al) da solução do solo, diminuindo sua atividade e, conseqüentemente, sua toxidez às plantas (MIYAZAWA et al., 2002; SALET et al., 1999). Portanto, em relação ao preparo convencional, o manejo da calagem passou-se a utilizar doses menores de calcário, ajustadas a uma camada diagnóstica de 0,00-0,10 m (CQFS-RS/SC, 2004); além da aplicação do insumo na superfície do solo e espaçadas por um intervalo de tempo superior a 4 anos. A aplicação de doses reduzidas de calcário tem efeito restrito às camadas superficiais (KAMINSKI et al., 2005; BORTOLUZZI et al., 2014) atingindo de forma mais lenta e pouco expressiva as camadas subsuperficiais (CAIRES, 2012).

A maioria dos Latossolos são naturalmente ácidos, e quando manejados sob SPD têm apresentado acentuado gradiente da qualidade química quando se comparam as camadas mais profundas do solo com a camada diagnóstica de 0,00-0,10 m (KLEPKER; ANGHINONI, 1995; SCHERER et al., 2007; DALLA NORA; AMADO, 2013). A inferior qualidade química subsuperficial é expressa por elevados teores de Al aliados a baixos valores de saturação por bases (RAIJ, 2010). Essa acentuada transição química entre as camadas do solo tem resultado em impedimento ao adequado desenvolvimento radicular das culturas, prejudicando o aproveitamento da água armazenada em camadas mais profundas (FOLONI;

ROSOLEM, 2006). O impedimento químico ao desenvolvimento radicular é mais crítico em anos de ocorrência de déficit hídrico, os quais têm sido recorrentes no Estado do RS (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014), especialmente em casos de baixos níveis de cálcio (Ca) em profundidade (KLEPKER; ANGHINONI, 1995; SCHERER et al., 2007). A situação de não revolvimento do solo tende a manter esta condição por longo prazo, gerando, como consequência prática, instabilidade na produtividade das culturas, de modo que as produtividades satisfatórias obtidas em anos de precipitação pluvial favorável conduzem à equivocada percepção de que o problema inexistente (DALLA NORA et al., 2014b). Frustrações das safras agrícolas no Brasil têm ocorrido especialmente por conta das condições hídricas. No caso específico do milho, a produção brasileira teve elevadas reduções nas safras de 1990/91, 1995/96, 1996/97, 1998/99, 1999/00, 2003/04, 2004/05 e 2011/12, devidas à ocorrência de estiagens com diferente intensidade (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Para a soja no Rio Grande do Sul, Berlato (1992) relatou que em anos muito secos (1978/79, 1985/86, 1987/88 e 1990/91), as produtividades médias estiveram abaixo de 1000 kg ha⁻¹.

As melhorias físico-hídricas do solo proporcionadas pelo SPD, tais como incremento da agregação, da macroagregação, continuidade de poros, aumento da retenção superficial da enxurrada pelo escoamento, aumento da infiltração, diminuição da evaporação, pela menor ação do vento e radiação solar sobre a superfície do solo (COGO et al., 2003; DERPSCH et al., 1991) tem sido negadas pela presença de camadas subsuperficiais com qualidade inferior. O tema de formação de uma camada de solo com qualidade química favorável ao desenvolvimento radicular definido neste trabalho como camada de enraizamento (CE) tem despertado a atenção de pesquisadores e agricultores. Caires (2012; 2013) sugeriu a formação da CE a partir da aplicação de dose elevada de calcário em superfície ou parcelada em curtos espaços de tempo. De acordo com o autor, a aplicação do calcário em superfície forma uma frente de alcalinização cuja intensidade é dependente da dose e da frequência de reaplicação. De acordo com Bortoluzzi et al. (2014) a incorporação de calcário em solos manejados sob SPD é uma estratégia para proporcionar a melhoria do ambiente subsuperficial. Entretanto, essa alternativa de interrupção do SPD, mesmo que temporária, do sistema tem resistência de ser aceita pelos produtores, devido à desestruturação física do solo, à oxidação biológica da MOS e a exposição do solo temporária aos agentes erosivos. Ainda, a eficiência da estratégia de incorporação de calcário quanto ao aprofundamento do sistema radicular tem sido questionada. Estudos de longa duração sob SPD demonstraram que cerca de 70% do

comprimento de raízes da cevada (CAIRES et al., 2001), trigo (CAIRES et al., 2002) e milho (CAIRES et al., 2004) se encontraram na camada de 0,0-0,20 m, e que 30% se encontraram nas camadas do subsolo (0,20-0,60 m), independentemente da aplicação do corretivo na superfície ou com incorporação.

Uma estratégia de formação de CE, que tem se destacado é a aplicação superficial de gesso agrícola combinada ao calcário sob SPD. Essa estratégia tem avançado no Estado do RS por ser rápida e por permitir a manutenção do SPD sem interrupção. A aplicação combinada do calcário e do gesso tem revelado efeito de sinergismo entre os produtos (corretivo + condicionador), com resultados superiores ao efeito isolado de cada insumo (RAIJ, 2010). Ao passo que o calcário eleva o pH, os teores de Ca e magnésio (Mg) na superfície do solo, o gesso, produto de solubilidade mais alta que o calcário, se dissocia liberando Ca e SO_4^{2-} (RAIJ, 2010). Com isso, há rápida movimentação do SO_4^{2-} acompanhando a água de drenagem para as camadas mais profundas do perfil, que ao se deslocarem verticalmente, favorece a movimentação de cátions, como é o caso do Ca, Mg e em menor intensidade o potássio (K) (RAIJ, 2010). Além disso, este processo favorece a formação do complexo AlSO_4^+ que possui menor atividade e, conseqüentemente, tem seu efeito tóxico às plantas reduzido, favorecendo o desenvolvimento radicular das culturas (RITCHEY et al., 1980).

Resultados reportados por Caires et al. (2004, 2008, 2012, 2013); Dalla Nora et al. (2014a,b) e Dalla Nora e Amado (2013) têm revelado a melhoria química do CE com o uso de gesso em SPD decorrente do aumento nos teores de Ca e Mg e redução na atividade do Al nas camadas subsuperficiais, resultando, na maioria das vezes, em aumento da produtividade das culturas agrícolas, especialmente do milho e do trigo, e em menor escala, de soja. Caires et al. (2004) concluíram que a aplicação conjunta de gesso agrícola e calcário ocasionou acréscimos na produção de milho na ordem de 17%. Porém, tão importante quanto o incremento da produtividade das culturas de grãos destaca-se a estabilidade da produção, atenuando o efeito de déficits hídricos. Os elevados custos e investimentos necessários para a produção de grãos no Brasil fazem com que a quebra de safra induzida pelo déficit hídrico possa ter elevado impacto na sustentabilidade do agronegócio. Muitos produtores podem ser obrigados a sair da atividade em função da quebra de safra. Além disto, a economia de Estados é fortemente impactada pela perda de receita com forte impacto social.

A importância do teor de Ca em profundidade se deve à sua função no crescimento radicular, estimulando a divisão celular. Como este elemento é imóvel na planta existe a necessidade da presença deste nutriente em profundidade onde ocorre o crescimento radicular

(HAWKESFORD et al., 2012) e também pela absorção significativa e quase exclusiva pela coifa da raiz (TAIZ; ZEIGER, 2009). Gramíneas, geralmente, são mais responsivas a aplicações de gesso e calcário quando comparadas com leguminosas (CAIRES et al., 2010) e isso pode ser decorrente de diferenças na CTC das raízes (FERNANDES; SOUZA, 2006).

Em relação ao pH, quando o ânion SO_4^{2-} é absorvido ativamente pelas plantas, faz com que estas aumentem na solução do solo a concentração de OH^- (MALAVOLTA et al., 1997), reduzindo, com isso, a acidez. Além disso, pode ocorrer a liberação de OH^- pelo SO_4^{2-} , a partir de reações de troca de ligantes com a formação de estruturas hidroxiladas de Al, mecanismo chamado por Reeve e Sumner (1972) de “autocalagem” e corroborado por Sumner et al. (1986) e Oliveira e Pavan (1996). A aplicação de gesso em superfície, pode reduzir a dissolução do calcário, pois o rápido aumento de Ca superficial retarda o efeito do calcário (SORATTO; CRUSCIOL, 2008).

Alguns autores observaram que a aplicação de gesso também pode levar à lixiviação de K para camadas em que não ocorre desenvolvimento radicular das culturas de grãos (RAMPIM et al., 2011). Embora preocupante este efeito não tem sido reportado frequentemente, este fato pode ser explicado pela baixa formação do par iônico K_2SO_4^0 (0,2 % do total solúvel) (ZAMBROSI et al., 2008). Ainda, a utilização de culturas de cobertura com profundo sistema radicular como o milheto, braquiária ou com alta afinidade por K como o nabo forrageiro pode contribuir para reduzir as perdas de K por lixiviação na entressafra. Já, a lixiviação de Mg pela aplicação de gesso tem sido mais frequente e reportada por vários autores (QUAGGIO et al., 1982; CAIRES et al., 2004; NAVA et al., 2012) e pode ser atribuída à competição do Mg com o Ca pelas cargas negativas do solo, de maneira que o Ca tem preferência nos sítios de troca (LOYOLA JR; PAVAN, 1989), essa lixiviação de Mg pode ser um problema caso o teor na superfície seja baixo. A formação da CE em Latossolo ácido e sem mobilização implica em lixiviação induzida de cátions e neutralização do Al tóxico de camadas subsuperficiais. Para que este processo ocorra os seguintes requisitos devem ser atendidos: a) formação de uma camada superficial enriquecida em cátions básicos, que irá atuar como uma camada de eluviação; para tanto doses elevadas e frequentes dos insumos são necessárias para que haja a saturação desta camada com Ca; b) o volume de precipitação deve ser elevado possibilitando a drenagem de água no perfil; c) teor de K na camada superficial deve ser elevado evitando desequilíbrio de bases d) presença de poros contínuos associados a atividade biológica que possibilitem infiltração de água; e) rotação de culturas com sistema radicular presente em diferentes profundidades e que proporcionem

elevado aporte de resíduos superficiais criando uma camada rica em MOS. O assunto ainda é recente sob SPD e deve merecer a atenção da pesquisa.

No Cerrado brasileiro, diversos trabalhos têm demonstrado aumento na produtividade das culturas de soja e milho e da estabilidade da produtividade de milho na safrinha a partir da melhoria química de camadas subsuperficiais do solo com o uso do gesso (SOUSA et al., 1996; SOUSA; LOBATO, 2004; EMBRAPA, 2010). O Estado do RS possui estudos escassos em relação ao efeito do gesso combinado ao calcário sobre a produtividade das culturas, da mesma forma que não há critérios que definam as condições ou parâmetros para a sua aplicação visando a correção de camadas subsuperficiais sob SPD e formação da CE. Dentre as justificativas apresentadas para sustentar a não necessidade de uso do gesso no RS estariam os maiores teores de Ca e os menores teores de Al de camadas profundas nos solos gaúchos em relação aos do Cerrado e a infrequente resposta de produtividade a aplicação de gesso agrícola. Nesse contexto, o presente estudo teve os seguintes objetivos: I- caracterizar os efeitos do uso isolado do gesso ou combinado com calcário sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas em SPD; II- avaliar o efeito da melhoria química da CE sobre a produtividade das culturas agrícolas em SPD sob condições de déficit hídrico induzido.

2. HIPÓTESES

- 1- O gesso aplicado isoladamente ou combinado ao calcário resulta na melhoria dos atributos químicos do solo afetando positivamente a produtividade das culturas em sistema plantio direto no Rio Grande do Sul.
- 2- A melhoria química das camadas mais profundas que 0,00-0,10 m afetam positivamente a produtividade das culturas em Sistema plantio direto.
- 3- Os efeitos da melhoria química da camada de enraizamento sobre a produtividade das culturas são mais pronunciados quando ocorre deficiência hídrica durante o período crítico da cultura.
- 4- A melhoria química da camada de enraizamento atenua os efeitos de déficits hídricos de curta duração sobre a produtividade das culturas.

3. ARTIGO I - PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS AFETADAS PELA MELHORIA QUÍMICA DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

3.1. Resumo

As melhorias dos atributos químicos proporcionadas pelo sistema plantio direto (SPD) têm se restringido às camadas superficiais do solo, resultando em acentuado gradiente de redução da qualidade química da superfície em direção às camadas profundas do perfil. A melhoria química de camadas subsuperficiais é uma estratégia de aprofundamento do sistema radicular das culturas e de incremento da produtividade de culturas de grãos. O objetivo desse estudo foi de caracterizar os efeitos do uso isolado do gesso ou combinado com calcário sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas em SPD. Foram selecionadas quatro Latossolos distróficos manejados sob SPD por longo prazo. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. Dois experimentos (I e II) foram implantados no ano de 2009 em Carazinho, sendo que os tratamentos consistiram de doses de gesso variando de 0,0 a 6,5 Mg ha⁻¹. Outros dois experimentos foram implantados em São Miguel das Missões (Experimento III) e Tupanciretã (Experimento IV) em 2011. No Experimento III utilizou-se um delineamento com parcelas subdivididas, sendo as parcelas compostas por doses de gesso variando de 0,0 a 5,0 Mg ha⁻¹, e as subparcelas pelos tratamentos sem calcário na dose de 2,0 Mg ha⁻¹. No Experimento IV utilizou-se um delineamento fatorial 4x4, com quatro doses de gesso que variam de 0,0 a 6,0 Mg ha⁻¹ e quatro doses de calcário variando de 0,0 a 4,8 Mg ha⁻¹. As amostragens de solo foram estratificadas na camada de 0,00-0,60 m. Verificou-se incremento nos teores de Ca e S em todo o perfil, além de redução na saturação por Al e aumento na saturação por bases e na saturação por Ca ao longo do tempo. Em resposta a melhoria da qualidade química da camada de enraizamento foi verificado aumento da produtividade da soja, milho e trigo. Na média dos experimentos, a dose de gesso que atingiu a máxima produtividade da soja foi de 4,7 Mg ha⁻¹, para o trigo de 4,5 Mg ha⁻¹ e para o milho de 5,5 Mg ha⁻¹. Quando houve rotação de culturas durante o verão, as profundidades de amostragem em que houve relação com a produtividade localizavam-se em camadas mais profundas (camada de 0,25-0,40 m para o Experimento I e camada de 0,00-0,40 m para o

Experimento II). Quando não houve rotação de culturas no verão as profundidades de amostragem que apresentaram relação com a produtividade situavam-se mais próximas da superfície (camada de 0,00-0,10 m para o Experimento III e camada de 0,00-0,25 m para o Experimento IV). Sugerindo que os parâmetros e camadas amostrais não correspondem ao preconizado pela CQFS-RS/SC (2004).

Palavras-chave: Gesso. Calcário. Cálcio. Saturação por Bases. Saturação por Al

Abreviações: Al – Alumínio; Ca - Cálcio; CQFS-RS/SC – Comissão de Química e Fertilidade do Solo; CTC – Capacidade de Troca de Cátions; F – Fluor; Mg – Magnésio; N – Nitrogênio; PRNT – Poder Real de Neutralização do Total; K – Potássio; P – Fósforo; PR – Produtividade Relativa; RS – Rio Grande do Sul; Sat. por Al – Saturação por Alumínio; S – Enxofre; SO_4^{2-} - Sulfato; SPD - Sistema Plantio Direto.

3.2. Introdução

A adoção do sistema plantio direto (SPD) associado à rotação de culturas tem se destacado como uma das principais alternativas para o uso sustentável dos recursos naturais (DEBARBA; AMADO, 1997; SÁ et al., 2010). Com isso, melhorias na qualidade química, física e biológica do solo vêm sendo observadas em áreas agrícolas de diferentes regiões do Brasil (DALLA NORA et al., 2013). Os resultados positivos obtidos sob SPD implicaram em uma rápida expansão do sistema, alcançando hoje área próxima a 27 milhões de hectares (CAIRES, 2013). No entanto, diversos estudos têm sugerido que as melhorias químicas no SPD são restritas às camadas superficiais, criando um perfil não favorável para o desenvolvimento radicular em subsuperfície com alto risco ao estresse hídrico (SHAINBERG et al., 1989; BLANCO-CANQUI; LAL, 2008; CAIRES et al., 2011a; DALLA NORA; AMADO, 2013).

Pelo elevado aporte de resíduos no SPD há aumento nos níveis de ácidos orgânicos simples e ácidos fúlvicos que complexam o Al da solução do solo de camadas superficiais, diminuindo sua atividade e, conseqüentemente, sua toxidez às plantas (MIYAZAWA et al., 2002; SALET et al., 1999). Em relação ao preparo convencional, para a correção da acidez

sob SPD passou-se a utilizar uma dose menor de calcário ajustada à uma camada diagnóstica de 0,00-0,10 m com aplicações espaçadas por longo intervalo de tempo (CQFS-RS/SC, 2004). Dessa forma, a melhoria da qualidade química das camadas subsuperficiais é improvável (BORTOLUZZI et al., 2014).

Essa redução da qualidade química em subsuperfície é caracterizada, especialmente, pelos elevados teores de Al e baixas concentrações de Ca, afetando negativamente o desenvolvimento radicular e conseqüentemente o uso da água (O'BRIEN; SUMNER, 1988). Portanto, o aprofundamento do sistema radicular das culturas tem sido um desafio sob SPD, sendo que o não revolvimento do solo tende a manter esta condição por longo prazo (DALLA NORA et al., 2014a).

A aplicação de uma única dose elevada de calcário em superfície ou parcelada em curtos espaços de tempo foi proposta por Caires (2012) como uma alternativa para melhoria da camada de enraizamento (CE) em Latossolos. Oliveira e Pavan (1996) e Caires et al. (2008) avaliando as camadas subsuperficiais, definidas como abaixo dos 0,20 m, observaram que o calcário aplicado na superfície, em SPD, proporcionou redução da acidez destas camadas, entretanto foi necessário o uso de doses elevadas e com reaplicação.

A utilização de gesso é uma importante alternativa para a melhoria química das camadas subsuperficiais, especialmente quando combinada com calcário, apresentando efeito de sinergismo entre os insumos, no qual são observados resultados superiores ao efeito isolado de cada insumo (RAIJ et al., 1994; RAIJ, 2010). Enquanto o calcário eleva o pH e os teores de Ca e Mg na camada superficial do solo, o gesso, produto de maior solubilidade que o calcário, se dissocia liberando Ca e SO_4^{2-} (PAULETTI et al., 2014). Com isso, há movimentação do SO_4^{2-} para as camadas mais profundas do perfil, que ao se movimentar verticalmente, favorece a movimentação vertical de cátions como é o caso do Ca e Mg (RAIJ, 2010). Além disso, ocorre a formação do complexo AlSO_4^+ que possui menor atividade, e assim não prejudica o desenvolvimento radicular das culturas (RITCHEY et al., 1980).

Resultados reportados anteriormente por Caires et al. (2004, 2008, 2012 e 2013); Dalla et al. (2013); Dalla Nora e Amado (2013); Blum et al. (2014) e Pauletti et al. (2014) têm revelado que a melhoria química da camada de enraizamento sob SPD a partir do aumento dos teores de Ca e Mg e redução da atividade do Al nas camadas subsuperficiais pelo uso isolado do gesso ou combinado com o calcário, resulta, na maioria das vezes, em aumento na produtividade das culturas, especialmente de milho e trigo, e com menor frequência, de soja.

No Cerrado brasileiro, especialmente onde é possível realizar duas safras anuais, a segunda safra (safrinha) é mais sujeita à ocorrência de déficit hídrico. Assim, diversos trabalhos têm demonstrado aumento na produtividade das culturas de soja e milho a partir da melhoria química nas camadas subsuperficiais do solo com o uso do gesso (SOUSA et al., 1996; SOUSA; LOBATO, 2004; EMBRAPA, 2010). O Estado do RS possui escassas avaliações sobre o efeito do gesso isolado ou em combinação com calcário sobre a melhoria química da camada de enraizamento e sua relação com a produtividade das culturas sob SPD. O principal objetivo deste trabalho foi caracterizar os efeitos do uso isolado do gesso ou combinado com calcário sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas em SPD.

3.3. Material e Métodos

3.3.1. Descrição das áreas de estudo

Realizaram-se quatro experimentos em três municípios do Estado do RS (Tabela 1). Em todos os experimentos, o solo de estudo foi um Latossolo Vermelho Distrófico típico (Typic Hapludox - Soil Survey Staff (2010)) com textura argilosa (EMBRAPA, 2006). Segundo Köppen (1938) o clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa). Os dados de temperatura do ar e precipitação pluvial média anual estão apresentados na Tabela 1. A precipitação de cada experimento foi monitorada por estações pluviométricas presentes em cada município. A precipitação pluvial ocorrida durante o período experimental está representada na Figura 1.

Tabela 1. Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude e precipitação pluvial anual.

Experimento	Município	Coordenadas	Altitude	Precipitação anual	Temperatura média	Área cultivada com soja*
1	Carazinho	28°19'S e 52°55'W	595 m	1821 mm	16°C	28000
2	Carazinho	28°17'S e 52°47'W	617 m	1821 mm	16°C	28000
3	São Miguel das Missões	28°40' S e 54°23'W	265 m	1651 mm	15°C	48000
4	Tupanciretã	29°00'S e 53° 94'W	507 m	1766 mm	17°C	116780

*Fonte: Luiz et al. (2012)

As áreas experimentais vinham sendo manejadas sob SPD há mais de 15 anos, recebendo doses próximas a $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico com PRNT de 75% espaçadas em intervalos de 4 a 5 anos. Todos os experimentos comportaram a cultura da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), a qual foi quimicamente manejada com glifosato [*N*-(fosfometil) glicina] e, então realizada à aplicação homogênea das doses de gesso isoladamente na superfície do solo no mês de agosto de 2009 para os Experimentos I e II; e do gesso combinado com calcário no mês de agosto de 2011 no Experimento III (o calcário foi aplicado em abril de 2013) e no Experimento IV (o gesso e o calcário foram aplicados simultaneamente).

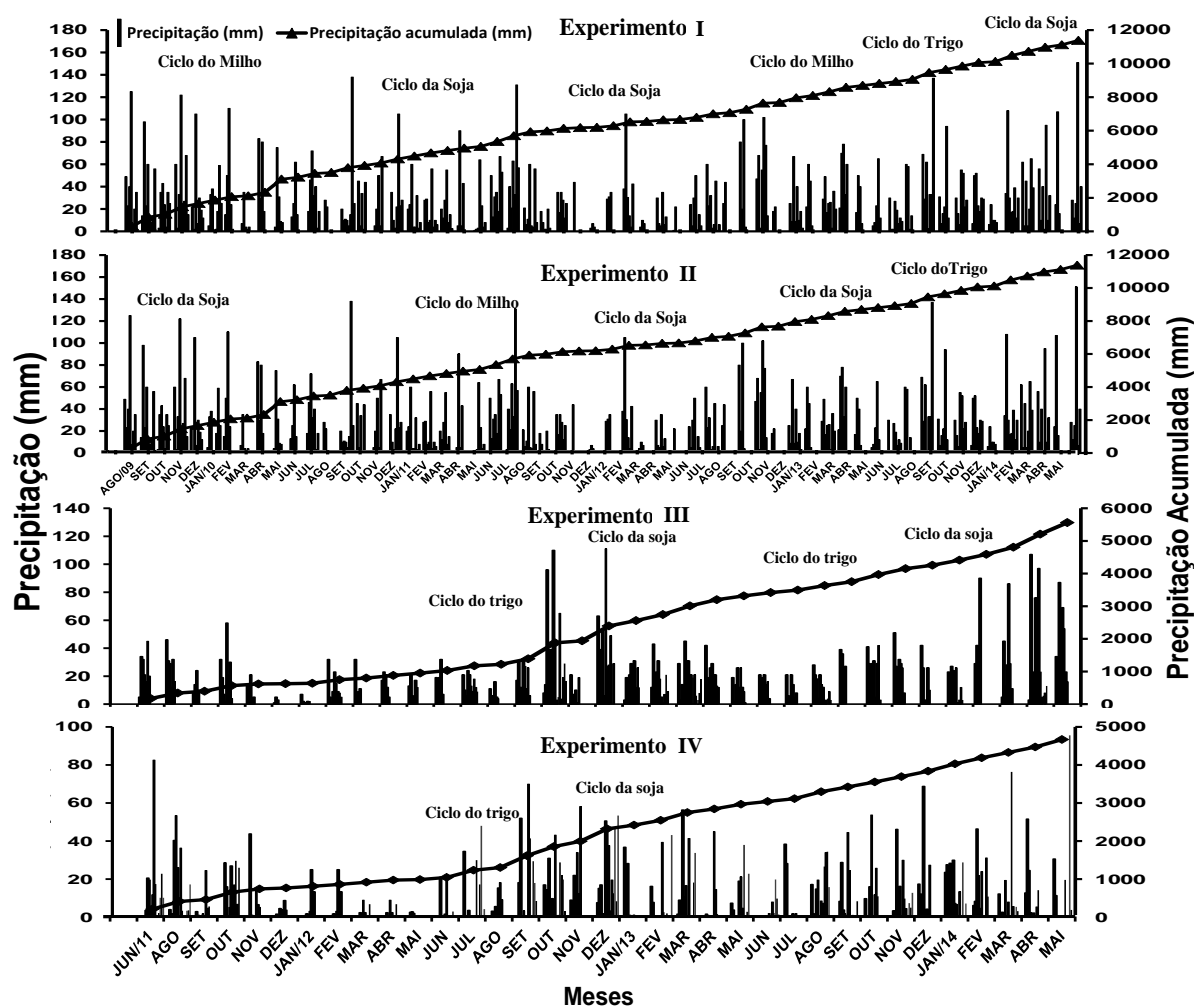


Figura 1: Precipitação diária e acumulada durante o período experimental para os Experimentos I, II, III e IV, além dos cultivos avaliados nos respectivos Experimentos. Fonte: INMET.

Para o Experimento I, posteriormente à dessecação da aveia preta, foi implantada a cultura do milho (*Zea mays* L.) com a seguinte adubação: 190 kg ha⁻¹ de N (20 kg ha⁻¹ de N de base e 170 kg ha⁻¹ de N parcelado em duas aplicações de cobertura), 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O. A fonte de N foi a ureia [CO(NH₂)₂] (45% of N), de P foi superfosfato triplo Ca(H₂PO₄)₂·H₂O (45% de P₂O₅) e de K foi cloreto de potássio (60% de K₂O). Na sucessão de culturas foi implantada a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) em julho de 2010 com a adubação de 230 kg ha⁻¹ da fórmula 5-25-25 e 45 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia, em cobertura. O trigo não foi colhido devido à geada na floração. Em sequência foi implantada a cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merr.] no mês de novembro de 2010 com a seguinte adubação: 240 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O). No inverno de 2011 foi implantada a cultura da aveia preta para fins de cobertura do solo. Em novembro de 2011 foi novamente

implantada a cultura da soja recebendo a adubação de 240 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O). No inverno de 2012 foi implantada a cultura da aveia preta para fins de cobertura do solo, em sequência foi implantada a cultura do milho com a seguinte adubação: 190 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N) (20 kg ha⁻¹ de N de base e 170 kg ha⁻¹ de N parcelado em duas aplicações de cobertura), 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O. No inverno de 2013 foi implantada a cultura do trigo com a adubação de 220 kg ha⁻¹ da fórmula 5-25-25 (N-P₂O₅-K₂O) e 40 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia em cobertura. Em sequência foi implantada a cultura da soja, no mês de novembro de 2013, com a seguinte adubação: 220 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O). Em resumo, a sucessão de culturas para o Experimento I foi: milho-trigo-soja-aveia preta-soja-aveia preta-milho-trigo-soja.

Para o Experimento II, após a dessecação da aveia preta foi realizada a implantação da soja em novembro de 2009 com a seguinte adubação: 230 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O). No ano de 2010 foi implantada a cultura da aveia preta consorciada com nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) durante o inverno, em sequência foi implantada a cultura do milho em outubro de 2010 com a adubação de 250 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O). No inverno de 2011 foi implantada a cultura da aveia preta para fins de cobertura do solo, em sequência foi implantada a cultura da soja em novembro de 2011 com adubação semelhante ao primeiro cultivo. No inverno de 2012 foi implantada a cultura da aveia preta seguida pela soja em novembro de 2012 com adubação semelhante aos cultivos anteriores de soja. Para o inverno de 2013 foi implantada a cultura do trigo com a seguinte adubação: 210 kg ha⁻¹ da fórmula 5-25-25 (N-P₂O₅-K₂O) e 50 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia em cobertura. Em sequência foi implantada a cultura da soja com adubação semelhante dos cultivos anteriores, este último cultivo de soja não pode ser colhido devido a problemas durante a colheita. Em resumo, a sucessão de culturas para o Experimento II foi: soja-aveia preta/nabo-milho-aveia preta-soja-aveia preta-soja-trigo-soja.

No experimento III, após a dessecação da aveia preta foi realizado a implantação da soja em novembro de 2011 com a seguinte adubação: 210 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O). Na sucessão de culturas foi implantado o trigo em julho de 2012 com a adubação de 210 kg ha⁻¹ da fórmula 5-25-25 (N-P₂O₅-K₂O) e 45 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia, em cobertura. Em novembro do mesmo ano foi implantada a cultura da soja (recebendo a mesma adubação do cultivo anterior) seguida pela cultura do trigo durante o inverno de 2013 com adubação semelhante ao primeiro cultivo de trigo. Em novembro de 2013 foi implantada a

cultura da soja com a seguinte adubação: 210 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O). Em resumo, a sucessão de culturas para o experimento III foi: soja-trigo-soja-trigo-soja.

Para o experimento IV, após a dessecação da aveia preta foi realizada a implantação da soja em novembro de 2011 com a seguinte adubação: 230 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O). Na sucessão de culturas foi implantado o trigo em julho de 2012 com a adubação de 220 kg ha⁻¹ da fórmula 5-25-25 e 45 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia, em cobertura. Em novembro do mesmo ano foi implantada a cultura da soja com a adubação de 230 kg ha⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P₂O₅-K₂O) seguida pela cultura da aveia preta durante o inverno de 2013 para fins de cobertura do solo. Em novembro de 2013 foi implantada a cultura da soja, as adubações foram semelhantes aos primeiros cultivos no experimento. Esse último cultivo de soja não pode ser colhido por problemas com aplicações de defensivos. Em resumo, a sucessão de culturas para o experimento IV foi: soja-trigo-soja-aveia preta-soja.

Os cultivares e híbridos usados nesse estudo foram: Pioneer 3069 nos Experimentos I e II e Dekalb 240 nos experimentos 3 e 4 para o milho; Nidera 5909 nos Experimentos I e II e Coodetec 235RR nos experimentos 3 e 4 para soja; Quartzo nos Experimentos I e II e BRS Tarumã nos experimentos 3 e 4 para o trigo. Estes materiais genéticos também são os mais representativos dos utilizados atualmente no RS. O milho foi semeado na densidade de quatro sementes m⁻¹ com espaçamento entre as linhas de 0,50 m; a soja foi semeada na densidade de 12,0 sementes por m (inoculada com *Bradyrhizobium japonicum*) com espaçamento entre linhas de 0,50 m; o trigo foi semeado na densidade de 60 sementes por m espaçadas a 0,20 m.

A caracterização química inicial foi realizada anteriormente à implantação dos experimentos a partir da coleta de cinco sub-amostras tomadas aleatoriamente em cada área experimental nas seguintes profundidades: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,25; 0,25-0,40 e 0,40-0,60 m. Na Tabela 2 estão apresentados os atributos químicos da caracterização inicial.

empregadas quatro doses de gesso: 0,0; 2,0; 4,0 e 6,0 Mg ha⁻¹, e quatro doses de calcário: 0,0; 2,4; 3,6 e 4,8 Mg ha⁻¹ de calcário. As doses de gesso e calcário foram aplicadas simultaneamente na superfície do solo em agosto de 2011.

O gesso agrícola (CaSO₄.2H₂O) utilizado nos experimentos continha em sua composição 210,0 g kg⁻¹ de Ca, 155,0 g kg⁻¹ de SO₄-S, 0,024 g kg⁻¹ de F e 9,0 g kg⁻¹ de P₂O₅. O calcário dolomítico continha 30% de CaO e 20% de MgO com 75% de PRNT e 85% de reatividade.

A doses de gesso de referência foi determinada de acordo com o teor de argila na camada de 0.20-0.40 m, seguindo a equação (1) (Quaggio and Raij, 1996) onde: NG= argila x 6,0

$$NG = \text{argila} \times 6,0 \quad (1)$$

NG= necessidade de gesso em kg ha⁻¹; Argila= teor de argila no solo g kg⁻¹

3.3.3. Descrição das principais avaliações

Para o Experimento I, as amostragens de solo foram realizadas aos seis, 14, 22, 32, 44 e 56 meses após a aplicação dos tratamentos. No Experimento II as amostragens foram realizadas aos seis, 22, 32, 44 e 56 meses após a aplicação dos tratamentos. Para os Experimentos III e IV as amostragens foram aos 15 e 30 meses após a aplicação dos tratamentos. No Experimento III, a amostragem de solo realizada aos 30 meses ocorreu após oito meses da aplicação de calcário nas subparcelas. O solo foi amostrado em três repetições para compor uma amostra de solo nas seguintes profundidades: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,25; 0,25-0,40 e 0,40-0,60 m pela abertura manual de trincheiras com dimensões de 0,3 x 0,3 x 0,6 m. As amostras de solo foram coletadas com uma espátula na parede frontal da trincheira e foram secas em estufas de ventilação forçada e manipuladas visando à retirada de raízes e resíduos de plantas.

Os atributos químicos foram determinados de acordo com os métodos descritos em Tedesco et al. (1995). As determinações químicas foram: pH em água (1:1 solo-água), teor de Al extraído com KCl 1 mol L⁻¹ e titulado com NaOH 0,0125 mol L⁻¹, Ca e Mg extraídos com KCL 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, P e K extraídos

com solução de Mehlich-I. A concentração de P foi determinada por colorimetria usando molibdato de amônio e o teor de K foi determinado por fotometria de chama. A determinação do teor de S foi realizada a partir da extração com $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{CH}_2\text{O}$ (500 mg L^{-1} de P) e posteriormente determinado por turbimetria (BEATON et al., 1968).

Na maturação fisiológica das culturas de milho, soja e trigo, adjacente ao local de coleta de amostras de solo, foram coletadas manualmente amostras para determinação da produtividade. Foram coletados quatro metros lineares das culturas (dois metros em cada linha de semeadura por subparcela), e a massa de grãos foi corrigida para umidade de 13%.

A produtividade relativa de grãos das culturas foi determinada para cada unidade experimental de todos os experimentos determinada pela equação 1:

$$\text{PR (\%)} = \frac{\text{Produtividade da cultura na parcela}}{\text{Produtividade máxima da cultura no experimento}} \times 100 \quad (1)$$

A produtividade máxima da cultura foi atingida a partir do ajuste da equação entre produtividade e as doses utilizadas nos tratamentos.

3.3.4. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o procedimento PROC GLM no SAS (Sistemas de Análise Estatística Institute Inc., 1985) em um modelo experimental de bloco ao acaso. O efeito das doses sobre a produtividade foi analisado por regressão utilizando o procedimento PROC REG no SAS. Para o Experimento IV, quando houve interação entre as doses de gesso e calcário os resultados foram analisados por meio de superfície de resposta e formação de uma função binomial entre a produtividade do trigo e soja com as doses de gesso e calcário. Quando houve efeito significativo entre os tratamentos e a saturação por bases, saturação por Al e saturação por Ca ao longo do tempo, foi realizada análise de regressão para os Experimentos I e II, para os Experimentos 3 e 4 as médias foram submetidas ao teste F e comparadas pelo teste de Tukey com significância em $p < 0,05$. Quando houve efeito significativo ($p < 0,05$) entre produtividade relativa com as doses de gesso e tempo, a análise de regressão foi realizada. Quando foi constatado efeito

significativo ($p < 0,05$) entre a produtividade relativa com a saturação por bases e saturação por Al nas diferentes camadas do solo, o efeito foi analisado por regressão.

3.4. Resultados e Discussão

3.4.1. Caracterização dos atributos químicos do solo quando da implantação dos experimentos

Embora todos os solos selecionados para os experimentos sejam classificados como Latossolos, notáveis diferenças no que diz respeito à qualidade química da CE podem ser observados entre os quatro Experimentos estudados (Tabela 2). A transição abrupta da qualidade química entre camadas superficiais e subsuperficiais pode ser observada em todos os solos avaliados, característica verificada frequentemente em Latossolos manejados sob SPD de longa duração (AMADO et al., 2009). Essa transição abrupta foi mais notória nos Experimentos 3 e 4 onde não havia rotação de cultura e, conseqüentemente, menor entrada de N (CAIRES et al., 2011a).

Em relação à camada superficial do solo de 0,00-0,10 m (média entre as camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m), os locais onde foram realizados os Experimentos I, II, IV apresentavam parâmetros químicos acima do limite crítico ($\text{pH} > 5,5$; saturação por bases $> 65\%$, saturação por Al $< 10\%$) proposto pela CQFS-RS/SC (2004) (Tabela 2), não demandando a aplicação de corretivos da acidez. Por outro lado, a área onde foi realizado o Experimento III apresentava todos os parâmetros químicos abaixo do limite crítico proposto, demandando o uso de corretivo. Em relação aos teores de S, as áreas referentes aos Experimentos I e II apresentava-se acima do limite crítico ($10,0 \text{ mg dm}^{-3}$) proposto por Fontes et al. (1982) e CQFS-RS/SC (2004) para leguminosas, sendo esperada a resposta à adição de S nos demais Experimentos.

Nas áreas dos Experimentos I e II, reduções mais intensas na saturação por bases e aumentos na saturação por Al foram encontradas nas camadas mais profundas do perfil (0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m) (Tabela 2). Na área do Experimento I, a saturação por bases reduziu em 42,2% e a saturação por Al aumentou em 250,0% na camada de 0,25-0,40 m em relação a

camada superior. Na área do Experimento II, a redução na saturação por bases foi de 36,0% na camada 0,25-0,40 m em relação a camada de 0,15-0,25 m; já a saturação por Al passou de 1,3% na camada de 0,15-0,25 m para 8,1% na camada de 0,25-0,40 m. Esse gradiente de redução da qualidade química foi observado de maneira semelhante para a camada de 0,40-0,60 m em relação à camada superior. Os resultados indicam que ambas as áreas que apresentavam rotação de culturas e especialmente com a cultura do milho com adubações nitrogenadas a qualidade química na camada de 0,00-0,25 m era favorável ao crescimento radicular, decrescendo a qualidade a partir desta profundidade.

A área do Experimento III, diferentemente dos demais Experimentos, apresentava reduzida qualidade química ainda nas camadas superficiais do solo (Tabela 2). No entanto, essa baixa qualidade química era ainda mais intensa nas camadas abaixo da superfície. A camada de 0,10-0,15 m em relação à camada superior apresentou redução de 55,6% na saturação por bases e aumento de 95,4% na saturação por Al, na camada de 0,15-0,25 m em relação à camada superior foi observada redução de 31,9% na saturação por bases e aumento de 41,4% na saturação por Al. Este resultado sugere que a área apresentou déficit de aplicação de calcário demandando a aplicação de calagem. Neste caso, a camada de 0,00-0,10 m pode ser considerada como eficiente para caracterizar a qualidade da CE.

A área do Experimento IV apresentou qualidade química satisfatória nas camadas superficiais (0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m) semelhantemente às áreas dos Experimentos I e II. No entanto, reduções abruptas na saturação por bases e aumentos pronunciados na saturação por Al foram observados ainda nas camadas intermediárias do solo (0,10-0,15 m e 0,15-0,25 m) (Tabela 2). Para a camada de 0,10-0,15 m em relação à camada superior, a redução na saturação por bases foi de 84,9% e a saturação por Al passou de 0,0% para 9,9%. Já, para a camada de 0,15-0,25 m em relação à camada superior houve redução de 32,1% na saturação por bases e aumento de 159,6% na saturação por Al. Esse gradiente foi ainda mais expressivo na camada de 0,25-0,40 m em relação à camada de 0,15-0,25 m, com redução de 108,9% na saturação por bases e aumento de 104,7% na saturação por Al. Esse declínio na qualidade química em subsuperfície deve-se, especialmente, ao aumento pronunciado dos teores de Al, os quais prejudicam o desenvolvimento radicular e conseqüentemente a produtividade das culturas (FARINA et al., 2000; ALLEONI et al., 2005). Portanto, neste Experimento sem rotação de culturas verificou-se que o programa de calagem só foi eficiente em corrigir a camada de 0-0,10 m, a partir desta profundidade existe acentuada perda da qualidade química. Destaca-se especialmente a área IV na qual a camada de 0-0,10 m não foi diagnóstica da

qualidade química da CE pois havia uma transição abrupta da qualidade química. Da análise conjunta constatou-se que as áreas com rotação de culturas os programas de calagem adotados foram eficientes para promover a correção da camada até 0,25 m, por outro lado, nas áreas sem rotação de culturas a camada corrigida restringiu-se a camada de 0,10 m. Neste último caso, a camada de 0,00-0,10 m só foi diagnóstico quando havia problema de acidez deste a camada superficial sugerindo uma subdosagem da calagem. Já na última área, na qual aparentemente a calagem foi corretamente manejada para corrigir a camada de 0,00-0,10 m constatou-se que esta camada já não foi mais diagnóstico da qualidade química da CE devido ao acentuado gradiente de qualidade química. A dosagem de calcário utilizado 2 Mg ha^{-1} espaçada a cada 4 anos, resultou em lento e limitado deslocamento vertical do calcário no perfil conforme anteriormente reportado por Caires et al. (2005) e Bortoluzzi et al. (2014). Este fato sugere que em SPD com sucessão de culturas (ausência de rotação) e com programa de calagem que utiliza a camada de 0,00-0,10 m e $\frac{1}{2}$ da dose atual, cenário de importantes áreas agrícolas do Sul do Brasil, existe a necessidade de adotar a camada de 0,00-0,20 m como critério para a recomendação da calagem em SPD (CAIRES, 2012) ou amostrar também camadas subsuperficiais (0,10-0,20 m ou 0,20-0,40 m) a exemplo do que é feito atualmente na agricultura de precisão (SCHWALBERT et al., 2014).

Em relação aos critérios propostos para aplicação de gesso agrícola, Sousa e Lobato (2002) sugeriram como valores críticos de $\text{Ca} < 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e saturação por $\text{Al} > 20,0\%$ na camada de 0,20-0,40 m. No Sul do Brasil, não existe recomendação de uso de gesso como condicionador de solo e portanto inexistem critérios para definição de dose. Porém, com base no que é utilizado em outros Estados, somente as áreas dos Experimentos III e IV atenderiam ao critério da saturação por Al , sendo esse fator ao menos duas vezes superior ao limite crítico pré-determinado (Tabela 2). No entanto, nenhum dos Experimentos estudados apresentava teores de Ca inferiores ao limite crítico, pelo contrário, os teores de Ca foram ao menos duas vezes superiores ao limite crítico. A recomendação citada anteriormente foi determinada com base em solos do Cerrado onde a CTC normalmente é baixa ($\cong 6,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), entretanto, o presente estudo foi conduzido em solos do Rio Grande do Sul com CTC média relativamente alta ($\cong 12,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) o que poderia resultar em um limite crítico mais elevado para o Ca .

3.4.2. Alterações nos atributos químicos do solo da CE após a aplicação da calagem e gessagem

Para todos os Experimentos avaliados foram observados efeitos significativos entre os tratamentos estudados e os teores de Ca e S. Ainda, houve efeito significativo na interação entre os tratamentos e as amostragens no tempo para os teores de Ca e S, para a maioria das áreas experimentais (com exceção do teor de S para o Experimento I e do teor de Ca para o Experimento II) (Apêndice A). O efeito dos tratamentos foi apresentado na Figura 2 com os aumentos nos teores de S e Ca ao longo do perfil do solo para a última coleta realizada em cada experimento. Nota-se incremento mais pronunciado nos teores de Ca e S nas camadas intermediárias (0,10-0,15 m e 0,15-0,25 m) e nas camadas mais profundas do perfil (0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m). Esses aumentos nos teores de Ca ao longo do perfil do solo afetaram positivamente a saturação por bases, além disso, ocorre redução na saturação por Al como resultado da maior atividade do Ca em solução associada à formação de $AlSO_4^+$ pela interação com o sulfato proveniente do gesso (FAVARETTO et al., 2008). Esse aumento dos teores de Ca e S em profundidade deve-se ao elevado volume de água potencializando a descida desses nutrientes.

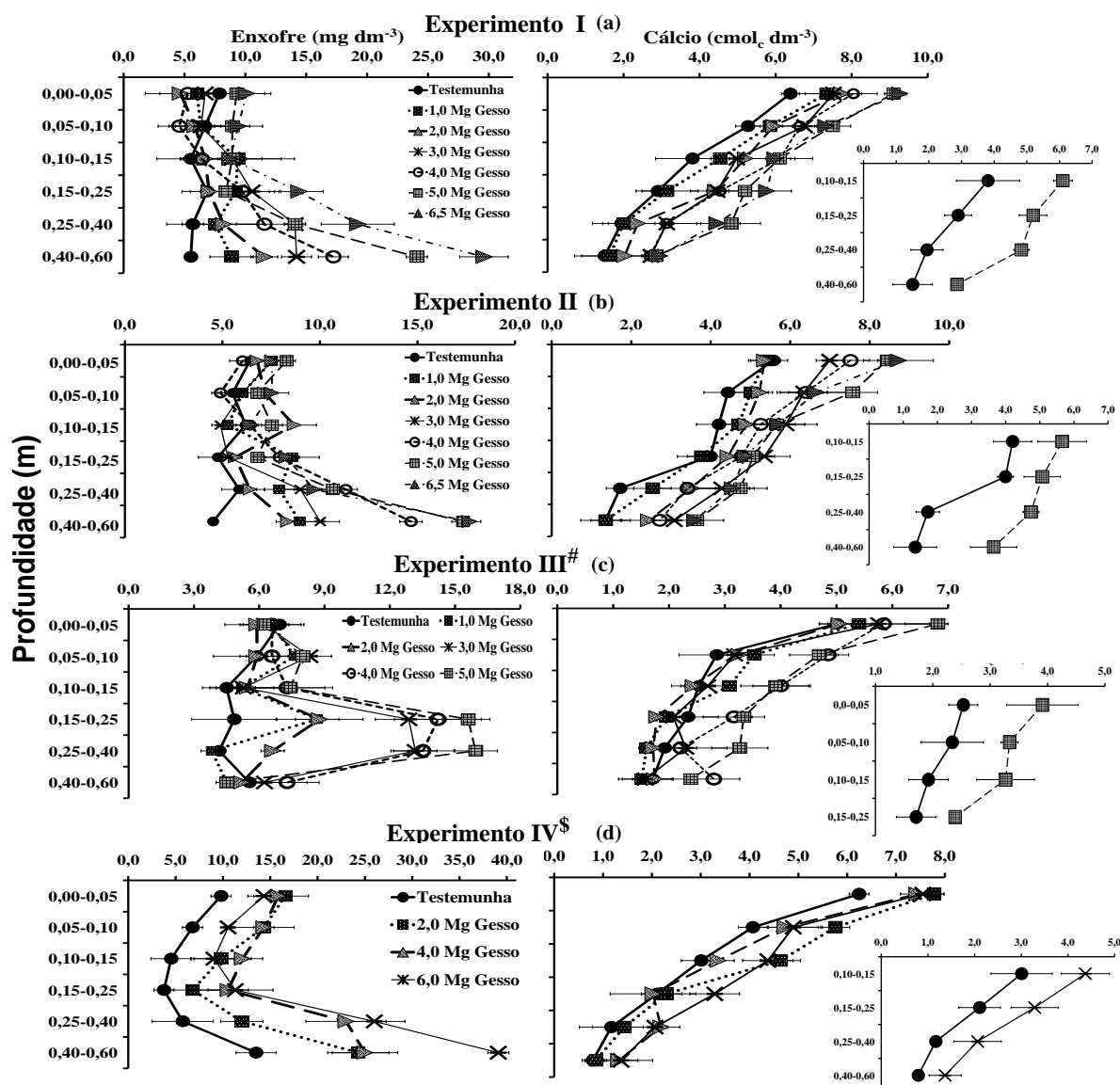


Figura 2: Efeito das doses de gesso sobre os teores de cálcio e enxofre no Experimento I após 56 meses (a), no Experimento II após 56 meses (b), no Experimento III após 30 meses (c) e no Experimento IV após 30 meses (d) da aplicação dos tratamentos. [#] Médias dos teores de S e de Ca entre os tratamentos que receberam calcário e os tratamentos que não receberam por conta da interação significativa entre as doses de gesso e calcário; ^{\$} Médias dos teores de S e de Ca para as doses de gesso combinadas a 3,6 Mg ha⁻¹ de calcário por conta da interação entre as doses de gesso e calcário. As barras de erro representam limites de 95% confiança para as medidas.

Por consequência da maior solubilidade do gesso quando comparada à solubilidade do calcário, associado ao fato de o S presente no gesso estar em sua forma oxidada (SO₄²⁻), após 56 meses (Figura 2a e 2b) e 30 meses (Figura 2c e 2d) foi constatado pequeno aumento nos teores de S nas camadas superficiais (0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m). Esse efeito foi decorrente

da migração do S presente na superfície para as camadas mais profundas do solo depois desse período de tempo (CAIRES et al., 2011a) e considerando o elevado volume de precipitação acumulado (Figura 1). O aumento dos teores de S na superfície não foi suficiente para alcançar o limite crítico ($10,0 \text{ mg dm}^{-3}$) proposto por Fontes et al. (1982) nas áreas dos Experimentos I, II e III após 56 meses da aplicação dos tratamentos (Figura 2). Esse incremento de S na camada superficial, apenas foi significativo ($p < 0,05$) para os tratamentos que receberam maiores doses de gesso. No Experimento I, o incremento significativo de S na camada de 0,00-0,05 m foi constatado na dose de $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, sendo esse incremento de 18,5% em relação ao tratamento testemunha (Figura 2a). Para essa mesma dose de gesso, o incremento foi de 29,7% no Experimento II (Figura 2b) e de 4,2% no Experimento III (Figura 3c). Para o Experimento IV todas os tratamentos apresentaram aumento significativo de S na camada de 0,00-0,05 m, com incremento médio de 51,0% entre as doses de gesso e o tratamento testemunha (Figura 4d). Portanto, o aumento do S na camada superficial ocorreu apenas nos primeiros meses após aplicação do gesso. Estes resultados concordam com o anteriormente reportado por Rampim et al. (2011), que encontraram aumentos de S na camada de 0,00-0,10 m após seis e 12 meses da aplicação de doses de até $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso. Já, Caires et al. (2011a), em um Latossolo, constataram que para doses de gesso de até $9,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ não foram verificados aumentos significativos de S na camada de 0,00-0,10 m após oito anos de aplicação dos tratamentos em um Latossolo.

Pela elevada mobilidade vertical do sulfato juntamente ao fluxo de água de drenagem, os maiores incrementos desse nutriente foram verificados nas camadas subsuperficiais (0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m) (Figura 2a). Para o Experimento I, na dose de $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, os incrementos de S foram de 147,2% e 338,2%, respectivamente, para as camadas de 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m em relação ao tratamento testemunha. Para o Experimento II, na dose de $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, esses incrementos foram de 84,5% e 284,4% para as respectivas camadas citadas anteriormente (Figura 2b). No Experimento IV, esses incrementos foram de 356,1% e 189,6%, respectivamente, para as camadas de 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m, para a dose de $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso combinada ao calcário em relação ao tratamento testemunha. A área do Experimento III, 30 meses após a aplicação dos tratamentos, apresentou comportamento diferenciado das demais, provavelmente devido aos elevados teores de argila, baixo pH e reduzidos teores iniciais de S (Tabela 2), no qual não foi observado aumento significativo de S na camada de 0,40-0,60 m, fato esse decorrente da possível retenção do S ainda nas camadas superficiais do solo. Dessa forma, os aumentos mais significativos de S no

Experimento III foram observados nas camadas de 0,15-0,25 m e 0,25-0,40 m, sendo tais incrementos na ordem de 271,4% e 189,1%, respectivamente, para as camadas citadas anteriormente na dose de 5,0 Mg ha⁻¹ em relação à testemunha (Figura 2c). Além disso, o tempo de reação e o volume precipitado no Experimento III foi inferior aos Experimentos I e II. O aumento nos teores de S nas camadas mais profundas do perfil evidencia a alta mobilidade desse elemento em solos de carga líquida negativa como já reportado em outros estudos (QUAGGIO et al., 1993; NOGUEIRA; MELO, 2003; CAIRES et al., 2011a; RAMPIM et al., 2011; PAULETTI et al., 2014). Em estudo realizado por Pauletti et al. (2014) em um Latossolo de textura argilosa do Paraná, os autores observaram que nos teores de S aumentaram até a camada de 0,80-1,00 m 36 meses após a aplicação de doses de gesso que variaram de 0,0 a 12,0 Mg ha⁻¹, já aos 72 meses os autores observaram reduções dos teores de S nas respectivas camadas, decorrentes de lixiviação desse nutriente até camadas mais profundas que 1,00 m.

Após 56 meses da aplicação dos tratamentos nos experimentos de longa duração e 30 meses da aplicação dos tratamentos nos experimento de média duração, foi constatado aumento nos teores de Ca ao longo de todo o perfil do solo, fato esse justificado pela formação do par iônico CaSO₄⁰ que desce no perfil do solo juntamente com o fluxo de água (FOLONI; ROSOLEM, 2006). De acordo com Nava et al. (2012), essa mobilidade do Ca associado ao uso do gesso deve-se ao efeito do SO₄²⁻ em anular a carga do Ca²⁺, resultando na formação do par iônico entre esses íons impedindo que o Ca ligue-se a outras cargas do solo.

Para a camada de 0,00-0,05 m, na dose de 5,0 Mg ha⁻¹, os incrementos nos teores de Ca foram de 42,2%, 50,0% e 36,4%, para os Experimentos I, II e III, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha. Para o Experimento IV, na dose de 6,0 Mg ha⁻¹ combinada ao calcário, o incremento no teor de Ca para essa mesma camada foi de 20,1% em relação a testemunha (Figura 2d).

Em relação às camadas subsuperficiais do perfil, os incrementos significativos nos teores de Ca para o Experimento I, na dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso, foram de 79,3%, 152,3% e 90,0% para as camadas de 0,15-0,25 m, 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m (Figura 2a), respectivamente, em relação ao tratamento testemunha. Para o Experimento II, os incrementos nas respectivas camadas foram de 27,5%, 175,6% e 170,3% para dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso (Figura 2b). Em relação ao Experimento III, para a dose citada anteriormente, esses incrementos foram de 43,5%, 68,4% e 41,2% para as camadas de 0,15-0,25 m, 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente (Figura 2c). Para o Experimento IV, na dose de 6,0 Mg ha⁻¹ de

gesso combinada ao calcário em relação ao tratamento testemunha, foram observados incrementos de 57,1%, 75,0% e 71,2% (Figura 2d), respectivamente, para as camadas citadas anteriormente. Resultados semelhantes foram encontrados por Rosolem e Machado (1984), Caires et al. (2003) e Silva et al. (2006). Rampim et al. (2011) relataram aumentos nos teores de Ca até a profundidade de 0,40 m com doses de até 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso, já aos seis meses após a aplicação dos tratamentos em um Latossolo do Paraná. Portanto, a semelhança do que ocorre com o S verificou-se importante incremento do Ca em profundidade nos tratamentos com gesso. Com calcário este processo raramente é verificado. Nota-se que o incremento de Ca ocorreu de forma semelhante ao incremento de S, especialmente nas camadas mais profundas do perfil do solo.

O incremento nos teores de Ca ao longo da camada de enraizamento é indispensável, especialmente nas camadas mais profundas e mais ácidas, devido sua função no crescimento radicular, atuando na divisão celular, (HAWKESFORD et al., 2012) e também pela absorção significativa e praticamente exclusiva pela coifa da raiz (TAIZ; ZEIGER, 2009). Portanto, associado ao fato de o Ca ser praticamente imóvel no floema, sua absorção pelas raízes superficiais não atende as demandas das raízes que se desenvolvem em camadas mais profundas, caso essas estejam em um ambiente ácido (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Foi verificado efeito significativo dos tratamentos nos teores de Mg em todos os Experimentos avaliados (Apêndice C). Nota-se redução desse nutriente nas camadas superficiais (0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m) (exceto para o Experimento IV que recebeu gesso combinado com calcário dolomítico) seguido de aumento significativo, em especial, para a camada mais profunda do solo (0,40-0,60 m) em todos os Experimentos estudados (Apêndice C). Esse aumento no teor de Mg em subsuperfície ocorre porque o par iônico MgSO₄⁰ é prioritário sobre as outras formas iônicas formadas pelo SO₄²⁻ (ZAMBROSI et al., 2008). Segundo Shainberg et al. (1989) a redução no teor de Mg em superfície pode acarretar em deficiências desse nutriente para as plantas, desde que a concentração mínima exigida para cada cultura seja atinjida. Porém, no presente estudo esses valores críticos não foram atingidos (teor crítico < 1,0 cmol_c dm⁻³ de acordo com a CQFS-RS/SC (2004)). Os teores de K foram pouco afetados pelos tratamentos, notando-se inclusive, aumentos nos teores trocáveis desse nutriente (Apêndice C). Reduzidas perdas de K em SPD associadas a aplicação de gesso têm sido reportadas em outros trabalhos (CAIRES et al., 2011b) e, dentre as explicações para esse efeito, destaca-se a reduzida formação do par iônico K₂SO₄⁰ (0,2 % do total solúvel) (ZAMBROSI et al., 2008).

Devido ao elevado incremento de Ca proporcionado pelas aplicações de gesso e calcário foram constatadas alterações significativas na relação Ca/Mg em diferentes camadas do solo para os quatro experimentos realizados (Apêndice D). No entanto, com exceção das doses mais elevadas de gesso, essa alteração da relação Ca/Mg não causou desbalanço dessas bases nas camadas superficiais do solo (0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m), considerando a relação ideal de 3:1 (Ca/Mg) proposta por Hernandez e Silveira (1998). Inclusive foi verificada melhoria dessa relação nas camadas mais profundas do solo (entre 0,15 m até 0,60 m).

Para Oliveira (2001), a relação (Ca+Mg)/K ideal situa-se na faixa de 20-30/1, especialmente no que diz respeito ao balanço nutricional da cultura da soja. De acordo com os resultados observados no Apêndice D, foram observados aumentos na relação (Ca+Mg)/K, especialmente nas áreas dos experimentos 1, 2 e 4. Contudo, nas camadas superficiais do solo (0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m), essa relação de bases permaneceu próxima da faixa ideal proposta por Oliveira (2001). Já, nas camadas mais profundas do perfil (entre 0,15 m e 0,60 m), a relação (Ca+Mg)/K foi aumentada profundamente situando-se acima da relação considerada ideal (20-30/1). Porém, esta camada provavelmente não seja tão crítica para a absorção de K pelas plantas que pode obter este nutriente de camadas mais superficiais.

3.4.3. Melhoria temporal dos atributos químicos do solo na camada de enraizamento

No presente estudo foi verificada interação significativa entre os tratamentos e o tempo sobre a saturação por bases, saturação por Ca e saturação por Al para os quatro Experimentos avaliados (Apêndice A). Para evidenciar o efeito temporal do gesso isoladamente ou do gesso combinado ao calcário sobre os parâmetros citados anteriormente foram selecionados três tratamentos para cada área experimental, sendo esses a testemunha, um tratamento com dose intermediária e um tratamento que recebeu dose elevada dos insumos. Para os Experimentos I, II e III, além da testemunha foram selecionadas as doses de 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso (Figuras 3, 4 e 5). Já, para o Experimento IV foram selecionados os tratamentos de 6,0 Mg ha⁻¹ de gesso e 6,0 Mg ha⁻¹ de gesso + 3,6 Mg ha⁻¹ de calcário (este último tratamento foi selecionado por ter apresentado os mais elevados incrementos sobre os atributos químicos anteriormente mencionados) (Figura 6).

Em relação ao tratamento testemunha, não foi observado alteração significativa sobre os índices saturação por bases, saturação por Ca e saturação por Al em nenhum dos Experimentos estudados (Figuras 3, 4, 5, 6). No entanto, a partir de 44 meses após a instalação dos experimentos, pode ser notado incremento na saturação por Al no Experimento I (Figura 3c) e Experimento II (Figura 4c), fato esse justificado pelo processo natural de acidificação do solo. Resultados semelhantes foram apresentados por Caires et al. (2005), em que os autores observaram redução significativa ($p < 0,01$) no pH do solo em função de longos períodos de tempo sob um Latossolo que não recebeu calagem, reiterando o processo natural de acidificação do solo e, conseqüente, aumento na saturação por Al. Para o Experimento I, na dose de $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, foi constatado ajuste quadrático e significativo entre o tempo de coleta e a saturação por bases (Figura 3a) e a saturação por Ca (Figura 3b) nas camadas de 0,00-0,05 m; 0,05-0,10 m e 0,10-0,15 m (Figura 2a). Resultados semelhantes foram anteriormente observados por Pauletti et al. (2014), tendo-se verificado que após 36 meses da aplicação dos tratamentos, doses de até $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso não incrementaram a saturação por bases ou a saturação por Ca em camadas mais profundas que 0,20 m. Contudo, a saturação por Al (Figura 3c) apenas foi afetada significativamente na camada de 0,40-0,60 m, fato esse justificado pelo maior incremento de S nessa camada (Figura 2a). De acordo com a equação ajustada para a camada de 0,40-0,60 m, o efeito mais evidente sobre os índices anteriormente mencionados ocorreram 32 meses após a aplicação do tratamento, resultando em redução de 32,8% na saturação por Al em relação á testemunha. Para a dose mais elevada de gesso ($5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), os incrementos significativos na saturação por bases e na saturação por Ca se deram, especialmente, nas camadas mais profundas do perfil (0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m). De maneira semelhante as camadas de 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m apresentaram efeito significativo de redução na saturação por Al ao longo do tempo, sendo essa redução de 35,4% e 45,9%, respectivamente, para as camadas citadas anteriormente, em relação ao tempo inicial de avaliação. De acordo com as equações ajustada, o máximo efeito na camada de 0,25-0,40 m foi atingido aos 32 meses após aplicação do tratamento, já para a camada de 0,40-0,60 m o máximo efeito ocorreu aos 37,5 meses após a aplicação do tratamento (Figura 3c). Esse rápido e intenso efeito proporcionado pelo gesso deve-se ao elevado volume precipitado na área experimental, (Figura 1) potencializando a solubilização do insumo e conseqüentemente a descida dos nutrientes junto ao fluxo de água.

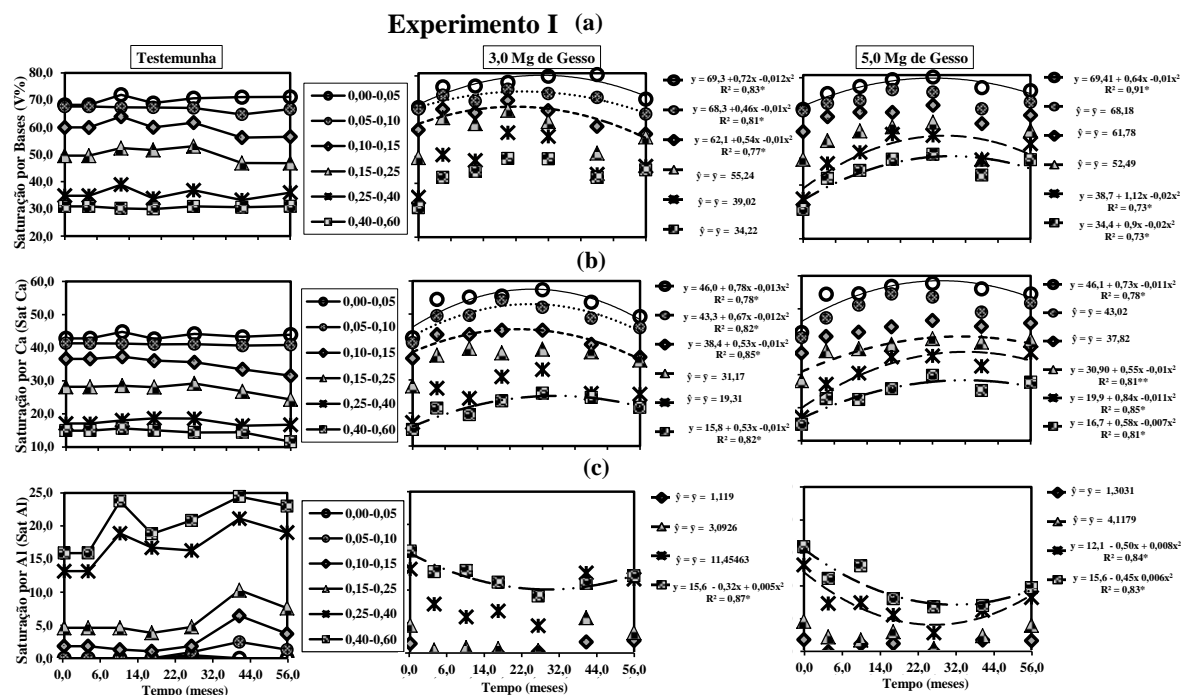


Figura 3: Efeito temporal das doses 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso sobre a saturação por Ca (a), saturação por bases (b) e saturação por Al (c) para o Experimento I. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.

Em relação ao Experimento II, para a dose de 3,0 Mg ha⁻¹ de gesso, foi verificado aumento na saturação por bases e na saturação por Ca em função do tempo em todas as camadas do solo, com ajuste quadrático para a maioria das profundidades. O ajuste quadrático sugere o decréscimo do efeito do gesso posteriormente a um determinado período de tempo (Figuras 4a e 4b). O acréscimo na saturação por bases e na saturação por Ca foi de 46,3% e 59,0%, respectivamente, em relação ao tempo zero depois de 35,5 meses na camada de 0,40-0,60 m. De maneira semelhante, a saturação por Al foi afetada de forma quadrática nas camadas de 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m (Figura 4c), com redução de 37,6% (46 meses após a aplicação dos tratamentos) e 42,9% (43 meses após a aplicação dos tratamentos), respectivamente, em relação ao tempo inicial, camadas essas que apresentavam os maiores teores de Al. O efeito mais intenso no Experimento II em relação ao Experimento I deve-se, provavelmente, ao menor teor de argila, maiores teores de S e maior pH inicial da camada superficial do solo (Tabela 2), permitindo que a movimentação vertical de bases e do SO₄ nos tratamentos com gesso fosse potencializada (RAIJ et al., 1994; RAIJ, 2010; CAIRES, 2012).

Com a dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso, no Experimento II, foi observado comportamento linear de redução na saturação por Al de acordo com o ajuste da equação para a camada de

0,40-0,60 m, sugerindo que em um solo com melhores condições químicas superficiais o efeito do gesso alcança camadas mais profundas do perfil e se estende por maior período de tempo (Figura 4c). Nesse contexto, após 56 meses da aplicação do gesso, foi verificado aumento de 63,7% na saturação por bases (Figura 4a), 56,5% na saturação por Ca (Figura 4b) e redução de 322% na saturação por Al (Figura 4c) em relação ao tempo inicial de avaliação na camada de 0,40-0,60 m. Em estudo realizado por Caires et al. (2011b), os autores observaram que a aplicação de doses de gesso em um Latossolo sem presença de Al promoveu efeito rápido e pronunciado na redistribuição de bases no perfil do solo por longo período de tempo. Este resultado sugere que a utilização de gesso induz a redistribuição vertical de cátions que em SPD de longa duração que pode ser uma importante estratégia de nutrição de plantas sob condições de deficit hídrico, estímulo ao aprofundamento do sistema radicular e equilíbrio de bases no complexo de troca.

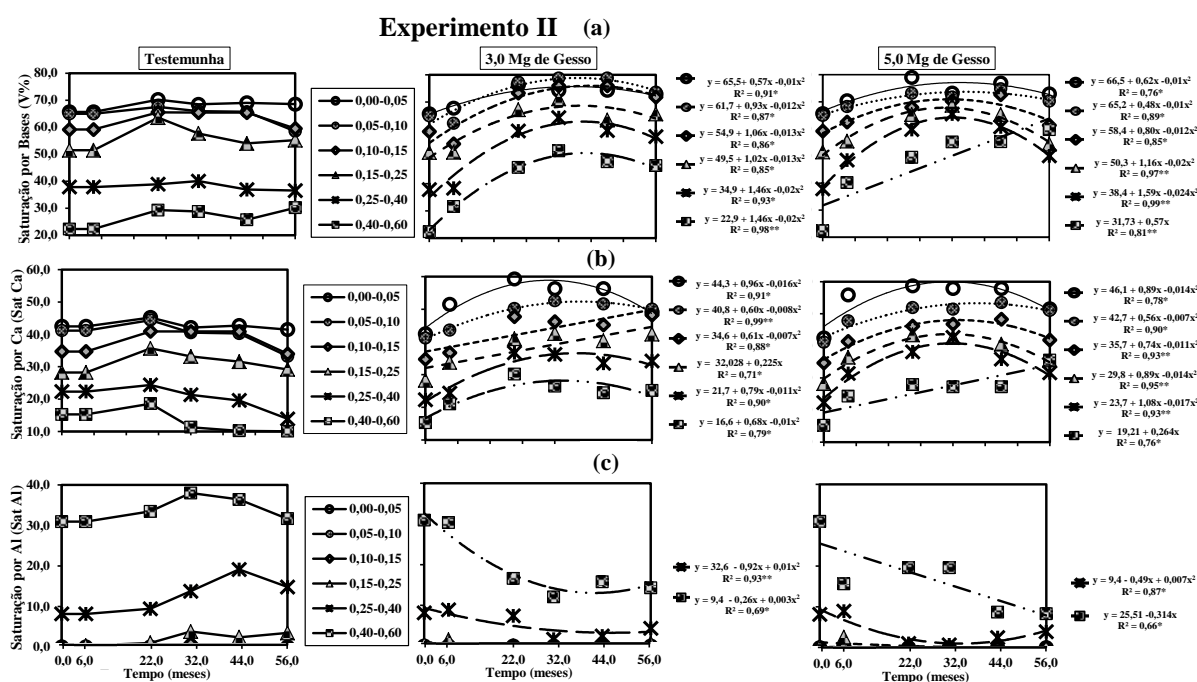


Figura 4: Efeito temporal das doses 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso sobre a saturação por Ca (a), saturação por bases (b) e saturação por Al (c) para o Experimento II. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.

A área do Experimento III era a que apresentava os maiores índices de acidez entre os experimentos investigados (Tabela 2). Nessa área não foi verificado aumento significativo na saturação por bases para a dose de 3,0 Mg ha⁻¹ de gesso em nenhuma das camadas

amostradas, aos 15 e aos 30 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 5a). Em relação a saturação por Ca, foi observado aumento significativo até a camada de 0,25-0,40 m, especialmente para a amostragem realizada aos 30 meses (Figura 5b), efeito esse associado a redistribuição de Ca da camada superficial até as camadas mais profundas (Figura 2c). Este resultado é relevante uma vez que o Ca proveniente do calcário quando aplicado na superfície raramente alcança camadas profundas (BORTULUZZI et al., 2014). Para o índice saturação por Al, apenas foi verificado decréscimo significativo ($p < 0,05$) aos 30 meses na camada de 0,25-0,40 m, sendo essa redução de 14,3% em relação ao tempo zero (Figura 5c), reiterando a maior deposição de S nessa camada (Figura 2c), e assim favorecendo a formação de $AlSO_4^+$ (RAIJ, 2010).

Na dose de $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, os aumentos significativos ($p < 0,05$) na saturação por bases foram evidenciados para a maioria das camadas até a profundidade de 0,40 m, sendo esses incrementos mais intensos nas profundidade de 0,15-0,25 m e 0,25-0,40 m para a amostragem realizada aos 30 meses em relação a primeira avaliação (incrementos esses de 59,5% e 26,2% para as respectivas camadas) (Figura 5a). Aumentos significativos na saturação por Ca foram observados em todo o perfil do solo após a aplicação dos tratamentos (Figura 5b), aos 15 meses esses incrementos foram verificados nas camadas superficiais (0,00-0,05 m; 0,05-0,10 m e 0,10-0,15 m), e aos 30 meses nas camadas mais profundas (0,15-0,25 m, 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m). Esses incrementos foram na ordem de 126,8%, 87,8% e 57,7%, respectivamente, para as três últimas camadas mencionadas. A movimentação vertical de Ca com a aplicação de gesso mesmo em solo ácido é um resultado relevante. Ainda, foi observada redução da saturação por Al nas camadas de 0,10-0,15 m, 0,15-0,25 m e 0,25-0,40 m (Figura 5c), zona onde houve o maior acréscimo dos teores de S para esse Experimento (Figura 2c). Essa redução, após 30 meses da aplicação dos tratamentos, foi na ordem de 68,4%, 76,2% e 76,3% para as camadas de 0,10-0,15 m, 0,15-0,25 m e 0,25-0,40 m, respectivamente, em relação à primeira amostragem. O efeito mais lento da melhoria da qualidade química na área do Experimento III, deve-se, especialmente, á reduzida qualidade química inicial da superfície do solo (Tabela 2). Esse fato reforça a recomendação da aplicação do gesso combinada com a de calcário ou em solo com a camada superficial previamente corrigida, porque, de acordo com Raij (2010) ao passo que o calcário eleva o pH e os teores de Ca e Mg na superfície do solo, o gesso, produto de maior solubilidade, se dissocia liberando Ca e SO_4^{2-} , com isso há rápida movimentação do SO_4^{2-} para as camadas mais profundas do perfil, favorecendo a movimentação de cátions como Ca e Mg.

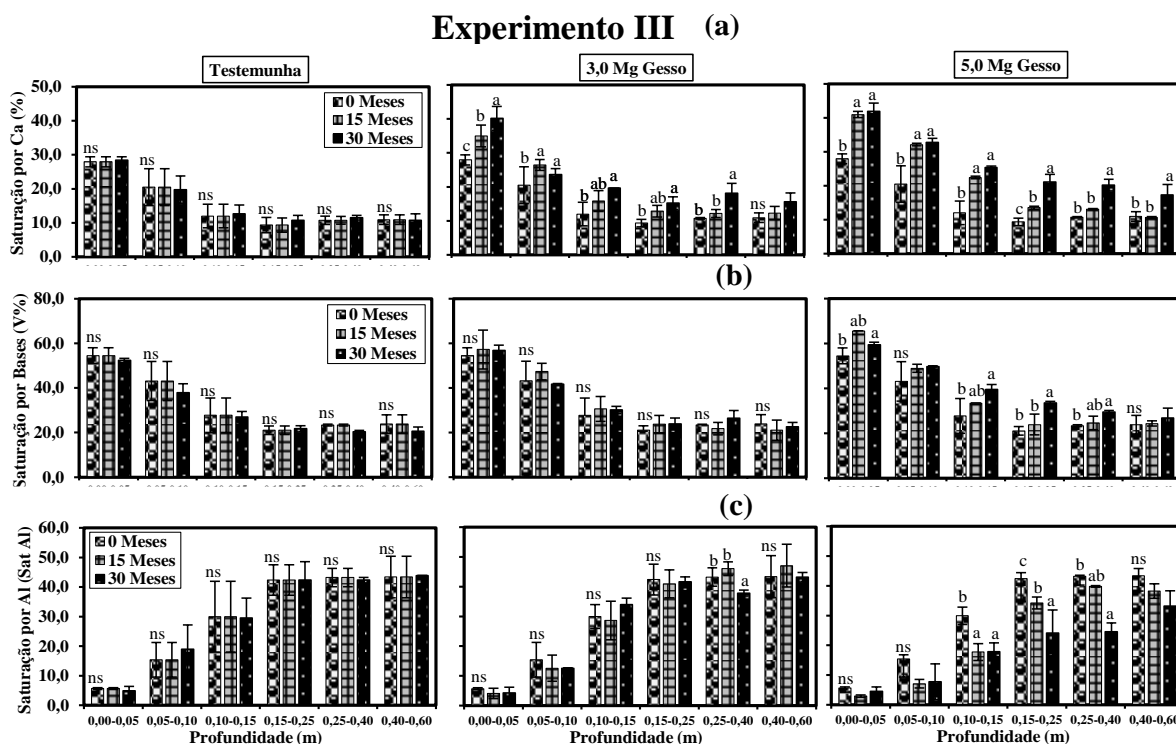


Figura 5: Efeito temporal das doses 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso sobre a saturação por Ca (a), saturação por bases (b) e saturação por Al (c) para o Experimento III. ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade de erro; Letras iguais nas barras não diferem significativamente a 5% de probabilidade de erro.

Com relação ao Experimento IV, para a dose de 6,0 Mg ha⁻¹ de gesso, apenas foram verificados aumentos significativos ($p < 0,05$) na saturação por bases a partir da camada de 0,10-0,15 m, sendo esses aumento mais intensos na avaliação realizada 30 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 6a). Os incrementos mais pronunciados ocorreram nas camadas de 0,15-0,25 m e 0,25-0,40 m na ordem de 38,5% e 50,7%, respectivamente. Este fato provavelmente esteja associado a inferior qualidade química da camada subsuperficial. Devido ao incremento de Ca proporcionado pelo gesso foram observados aumentos significativos na saturação por Ca desde a camada superficial (0,00-0,05 m) até a camada mais profunda (0,40-0,60 m) (Figura 6b). Para as camadas de 0,15-0,25 m e 0,25-0,40 m esses incrementos foram na ordem de 146,7% e 188,3%, respectivamente, após 30 meses da aplicação dos tratamentos em relação ao tempo inicial de avaliação. Este resultado está de acordo com o observado no Experimento III. A saturação por Al foi eliminada na camada 0,10-0,15 m, além disso, após 30 meses da aplicação dos tratamentos foram constatadas

reduções na saturação por Al de 30,5% e 20,1% nas camadas de 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente, em relação à primeira avaliação (Figura 6c).

Com relação ao tratamento que recebeu 6,0 Mg ha⁻¹ de gesso + 3,6 Mg ha⁻¹ de calcário foi constatado aumento significativo na saturação por bases ($p < 0,05$) em todo o perfil do solo, com exceção da camada de 0,00-0,05 m aos 30 meses de aplicação dos tratamentos (Figura 6a). Esse incremento, 30 meses após aplicação dos tratamentos, foi de 141,4% e 144,7% nas camadas de 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente, em relação à primeira época de avaliação. Para a saturação por Ca (Figura 6b) foi verificado incremento significativo em toda a camada de enraizamento após 30 meses da aplicação dos tratamentos. Para as camadas de 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m foram constatados incrementos de 136,3% e 152,0%, respectivamente, em relação ao tempo inicial de avaliação. Foi verificada redução significativa da saturação por Al em todas as camadas avaliadas, ressaltando que o Al na camada de 0,10-0,15 m foi completamente neutralizado (Figura 6c). Já, para as camadas de 0,15-0,25m, 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m, as reduções foram de 228,2% 47,7% e 34,0%, respectivamente, 30 meses após a aplicação dos tratamentos em relação à avaliação inicial. Esse efeito de interação do calcário com gesso sobre os atributos químicos do solo foram reportados por diversos estudos realizados anteriormente em Latossolos (CAIRES et al., 2003; RAIJ, 2010; SOUZA et al., 2012; DALLA NORA et al., 2014b; PAULETTI et al., 2014). Em estudo realizado por Dalla Nora et al. (2014b), aumentos na saturação por bases e reduções na saturação por Al até a camada de 0,40-0,60 m foram observados já aos seis meses após a aplicação combinada de gesso e calcário em um Latossolo. Os resultados obtidos no Experimento IV que apresentava acentuado gradiente de qualidade química entre a camada superficial e as camadas profundas foi atenuado pela aplicação combinada de calcário + gesso, dispensando a necessidade de incorporação dos insumos.

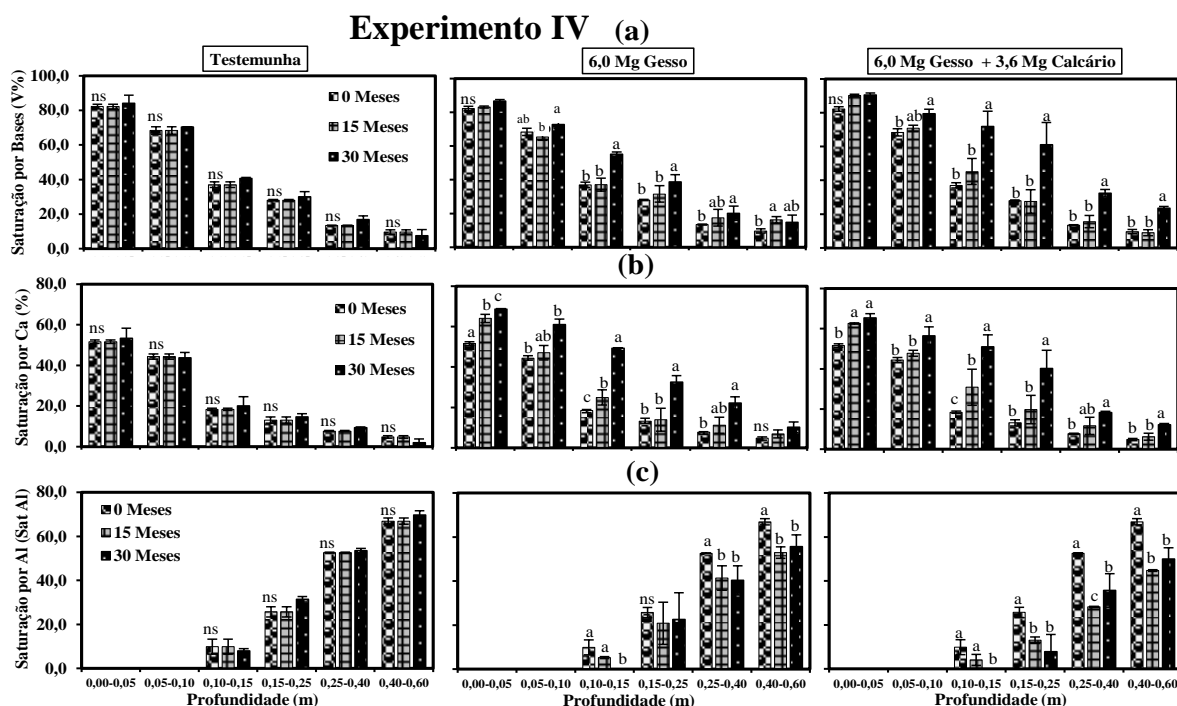


Figura 6: Efeito temporal das doses $0,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso; $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso e $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso + $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário sobre a saturação por Ca (a), saturação por bases (b) e saturação por Al (c) para o Experimento IV. ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade de erro; Letras iguais nas barras não diferem significativamente a 5% de probabilidade de erro.

3.4.4. Efeito da qualidade química da camada de enraizamento sobre a produtividade de culturas de grãos

Durante o período de estudo foram avaliadas 16 safras de soja, trigo e milho, em quatro Experimentos com distinta qualidade química na camada de enraizamento incluindo solos ácidos desde a camada superficial, solos com a camada superficial corrigida e camada subsuperficial ácida e solos com correção até a camada de 0,00-0,40 m. Deste conjunto em apenas três safras não houve efeito positivo e significativo dos insumos utilizados (Apêndice B). A falta de resposta para o Experimento I, no cultivo da soja de 2013/14 (Figura 7a), certamente foi ocasionada pela elevada precipitação pluvial durante o ciclo (Figura 1) e ao elevado tempo transcorrido da aplicação do insumo (54 meses). Já para o Experimento II, a falta de resposta durante a safra da soja de 2009/10 (Figura 7b) também pode estar associada a elevada precipitação pluvial durante o ciclo que atingiu 1212,0 mm (Figura 1), e para o trigo

de 2013 (Figura 7b) a não ocorrência de aumento na produtividade provavelmente foi devido ao tempo de aplicação dos tratamentos (48 meses) e à elevada precipitação (935,0 mm) (Figura 1). A resposta da soja a aplicação de gesso é influenciada pela precipitação, apresentando produtividades reduzidas ou nulas da cultura da soja sob condições de elevada precipitação (CAIRES et al., 2011a; RAMPIM et al., 2011).

Para o Experimento I (Figura 7a), de acordo com a equação ajustada para a cultura do milho na safra de 2009/10, a dose de 5,9 Mg ha⁻¹ alcançou na maior produtividade (11247 kg ha⁻¹), representando incremento de 8% em relação à testemunha. Esse resultado foi obtido mesmo em um ano de precipitação pluvial elevada (1249,0 mm durante o ciclo) (Figura 1), sugerindo que o efeito positivo do gesso sobre a produtividade das culturas não ocorre apenas em situações de déficit hídrico. Para a safra de milho de 2012/13, as doses de gesso resultaram em aumento linear na produtividade, sendo que a dose máxima de gesso (6,5 Mg ha⁻¹) resultou na produtividade de 10406 kg ha⁻¹, correspondente a 7,5% superior ao tratamento testemunha. Estes resultados sugerem resposta positiva ao uso de gesso mesmo em solo com camada de enraizamento corrigida (Tabela 2) e precipitação favorável ao desenvolvimento vegetal (Figura 1). Neste Experimento os tratamentos testemunha apresentaram elevada produtividade de milho (10700 e 9837 kg ha⁻¹ nas safras 2009/10 e 2012/13, respectivamente), sugerindo que a redistribuição de bases e a melhoria química de camadas profundas é uma importante alternativa para incremento da produtividade mesmo em áreas bem manejadas sob SPD. Elevada produtividade do milho em um Latossolo com aplicação de gesso mesmo sob precipitação pluvial normal foi observada por Pauletti et al. (2014), tendo-se obtido incrementos de 14% e 39% para as safras de 2003 e 2004, respectivamente, para dose de até 12,0 Mg ha⁻¹.

Para a cultura do trigo na safra de 2013, a maior produtividade encontrada foi de 3288 kg ha⁻¹ para a dose de 6,4 Mg ha⁻¹ de gesso, resultando no incremento de 7% em relação ao tratamento testemunha (Figura 7a). Resultados semelhantes foram observados por Caires et al. (2002), os quais obtiveram aumento na produtividade do trigo com doses de até 9,0 Mg ha⁻¹ de gesso mesmo em um ano sem ocorrência de déficit hídrico.

Ainda no Experimento I, foi observado aumento na produtividade da soja com aplicação de gesso em duas das três safras avaliadas (Figura 7a). Para a safra de 2010/11 o incremento na produtividade foi de 8% em relação à testemunha para a dose de 5,7 Mg ha⁻¹, a qual atingiu a produtividade de 4733 kg ha⁻¹ de acordo com a equação ajustada. Durante a safra de 2011/12 o incremento na produtividade de grãos foi superior ao verificado no ano

anterior, resultando no aumento de 16% em relação à testemunha para dose de 6,2 Mg ha⁻¹, a qual atingiu a produtividade de 3678 kg ha⁻¹. Esse maior incremento relativo na segunda safra deve ter sido ocasionado pela reduzida precipitação pluvial durante o ciclo da cultura (401,0 mm) (Figura 1) induzindo que as plantas investissem mais fotoassimilados em raízes para utilizar a água do solo armazenada em camada mais profundas (SHAINBERG et al., 1989). Nesse contexto, o ambiente subsuperficial enriquecido em Ca (Figura 2a) e com menor atividade do Al (Figura 3c), por resultado do efeito do gesso, provavelmente possibilitou maior desenvolvimento radicular afetando positivamente a produtividade. Resultados semelhantes aos desse estudo foram reportados por Pauletti et al. (2014), tendo-se verificado incrementos na produtividade da soja nas safras de 2003/04 e 2005/06 a partir da aplicação de doses de gesso em um Latossolo.

Para o Experimento II a produtividade de milho no ano de 2010/11 foi influenciada de forma quadrática e significativa pelas doses de gesso. O incremento na produtividade de grãos foi 19% superior à testemunha para a dose de 5,6 Mg ha⁻¹, a qual atingiu a produtividade de 12360 kg ha⁻¹ de acordo com a equação ajustada (Figura 7b). Resultados semelhantes foram encontrados por Fageria (2001), sendo que os autores observaram aumentos de 23% na produtividade do milho com o uso de gesso. De maneira semelhante à observada para o Experimento I, a produtividade de milho no Experimento II foi positivamente afetada mesmo em uma condição em que o tratamento testemunha já atingiu alta produtividade (9946kg ha⁻¹) decorrente de satisfatória qualidade química inicial (Tabela 2).

Para a soja, safra de 2011/12, foi verificado incremento de 11% para a dose de 5,3 Mg ha⁻¹ de acordo com a equação ajustada, atingindo a produtividade de 2744 kg ha⁻¹ (Figura 7b). O elevado incremento na produtividade dessa safra certamente se deve a baixa precipitação pluvial durante o ciclo da cultura (401,0) (Figura 1) que resultou em uma média de produtividade muito abaixo das demais safras da área experimental (Figura 7b). Em relação à safra de 2012/13 foi verificado efeito linear entre a produtividade da soja e as doses de gesso, sendo que o incremento na produtividade para a maior dose de gesso (6,5 Mg ha⁻¹) que atingiu 3764 kg ha⁻¹, foi de 7% em relação à testemunha. Esse resultado provavelmente se deve, ao fato de as doses de gesso terem atingido o efeito máximo na melhoria química do perfil aos 44 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 4), período no qual foi coincidente com a safra de 2012/13.

A área do Experimento III destacava-se das demais Experimentos por apresentar elevada acidez e baixa saturação por bases ainda nas camadas superficiais do solo (0,00-0,05

m e 0,05-0,10), condição essa agravada nas camadas mais profundas do perfil (0,015-0,25 m e 0,25-0,40 m) (Tabela 1). Além disso, a condição de acidez na camada de 0,25-0,40 m sugere que essa área teria elevada probabilidade de resposta à aplicação de gesso agrícola. De fato, conforme esperado todas as safras avaliadas apresentaram aumento de produtividade com as doses isoladas de gesso ou combinadas ao calcário (Figura 7c). Para o primeiro cultivo de trigo (2012) (Figura 7c), de acordo com a equação ajustada, a dose de gesso que proporcionou a maior produtividade da cultura (2448 kg ha^{-1}) foi de $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo essa produtividade 12% superior à do tratamento testemunha.

Em relação ao segundo cultivo do trigo (2013), posteriormente a subdivisão das parcelas e formação de subparcelas que combinaram as doses de gesso com $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, foi constatada produtividade máxima de 2060 kg ha^{-1} para a dose de $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, o que resultou em incremento de 22% em relação à testemunha. Para a combinação das doses de gesso com a dose de $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, foi constatada produtividade máxima de 2301 kg ha^{-1} para a dose de $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso combinada a $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, ou seja, incremento de 20% em relação à testemunha. Comparando as testemunhas, observou-se aumento de 15% para a testemunha que recebeu $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário e não recebeu gesso em comparação a testemunha que não recebeu calcário ou gesso. Portanto, para a máxima produtividade de 2059 kg ha^{-1} atingida com a dose isolada de $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, seria necessária a aplicação de $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ calcário + $1,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso (Figura 7c).

Com relação à cultura da soja na safra de 2012/13, foi verificado ajuste linear e significativo entre as doses de gesso e a produtividade da soja, sendo a máxima produtividade da cultura de 4007 Mg ha^{-1} atingida na dose de $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, representando incremento de 11% em relação a testemunha (Figura 7c). Tais resultados corroboram recentes estudos que tem reportado aumento na produtividade das culturas de grãos pelo uso isolado do gesso ou combinado ao calcário em Latossolos manejados sob SPD (CAIRES et al., 2011b; RAMPIM et al., 2011; DALLA NORA; AMADO, 2013; DALLA NORA et al., 2014a,b).

Para a safra de soja de 2013/14, foi observado efeito quadrático entre as doses de gesso e a produtividade da cultura (Figura 7c). Para os tratamentos que receberam doses isoladas de gesso foi observada máxima produtividade de 2574 kg ha^{-1} na dose de $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, representando incremento de 27%. Já para os tratamentos que receberam $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, a máxima produtividade de 2655 kg ha^{-1} foi atingida na combinação com $4,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, o que representou incremento de 15% em relação à testemunha.

Comparando a parcela testemunha foi verificado incremento de 19% na parcela que recebeu $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário e não recebeu gesso. Portanto, de acordo com a equação ajustada com a combinação de $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário + $0,77 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso seria alcançada a produtividade máxima de 2574 kg ha^{-1} que foi atingida com $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso aplicado isoladamente. Esse resultado mais expressivo ocasionado pela ação do calcário deve-se à reduzida qualidade química ainda nas camadas superficiais do solo (Tabela 2). Como reportado por Rajj (2010), a combinação do gesso ao calcário, notadamente em solos ácidos, apresenta efeito de interação superior aos efeitos isolados de cada insumo. Resultados semelhantes aos encontrados nesse estudo foram descritos por Caires et al. (2003, 2004, 2011a), Souza et al. (2012), Dalla Nora et al. (2014) e Pauletti et al. (2014).

O Experimento IV, de maneira semelhante ao que foi observado no Experimento III, apresentou interação significativa entre as doses de calcário e gesso para as produtividades da soja e trigo. De acordo com o ajuste da equação binomial, a máxima produtividade trigo para a safra de 2012 foi de 2454 kg ha^{-1} para a combinação de $4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário + $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso (Figura 7d), resultando no incremento de 18% na produtividade da cultura. Para as doses isoladas de gesso a máxima produtividade foi de 2149 kg ha^{-1} na dose de $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, já para os tratamentos com doses isoladas de calcário a máxima produtividade de 2251 kg ha^{-1} foi atingida com $4,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário. Este resultado é relevante pois com base na atual recomendação da CQFS-RS/SC (2004) este solo não demandaria a aplicação de calcário.

Ainda para o Experimento IV, em relação à cultura da soja na safra de 2012/13 (Figura 7d), de acordo com a equação binomial ajustada, a máxima produtividade de 3350 kg ha^{-1} foi atingida com a combinação de $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário + $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, resultando em no incremento de 14% na produtividade. Para a aplicação isolada de gesso, a máxima produtividade de 3146 kg ha^{-1} foi atingida com a dose de $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, já para a aplicação isolada de doses de calcário, a máxima produtividade de 3326 kg ha^{-1} foi atingida com a dose de $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$. Tais resultados corroboram o efeito de interação entre o gesso e o calcário como descrito por Caires (2013), Rajj et al. (1994) e Rajj (2010). Ainda, os resultados encontrados nesses solos colocam em cheque a camada de 0,00-0,10 m como diagnóstico para SPD com histórico de aplicação superficial de calcário.

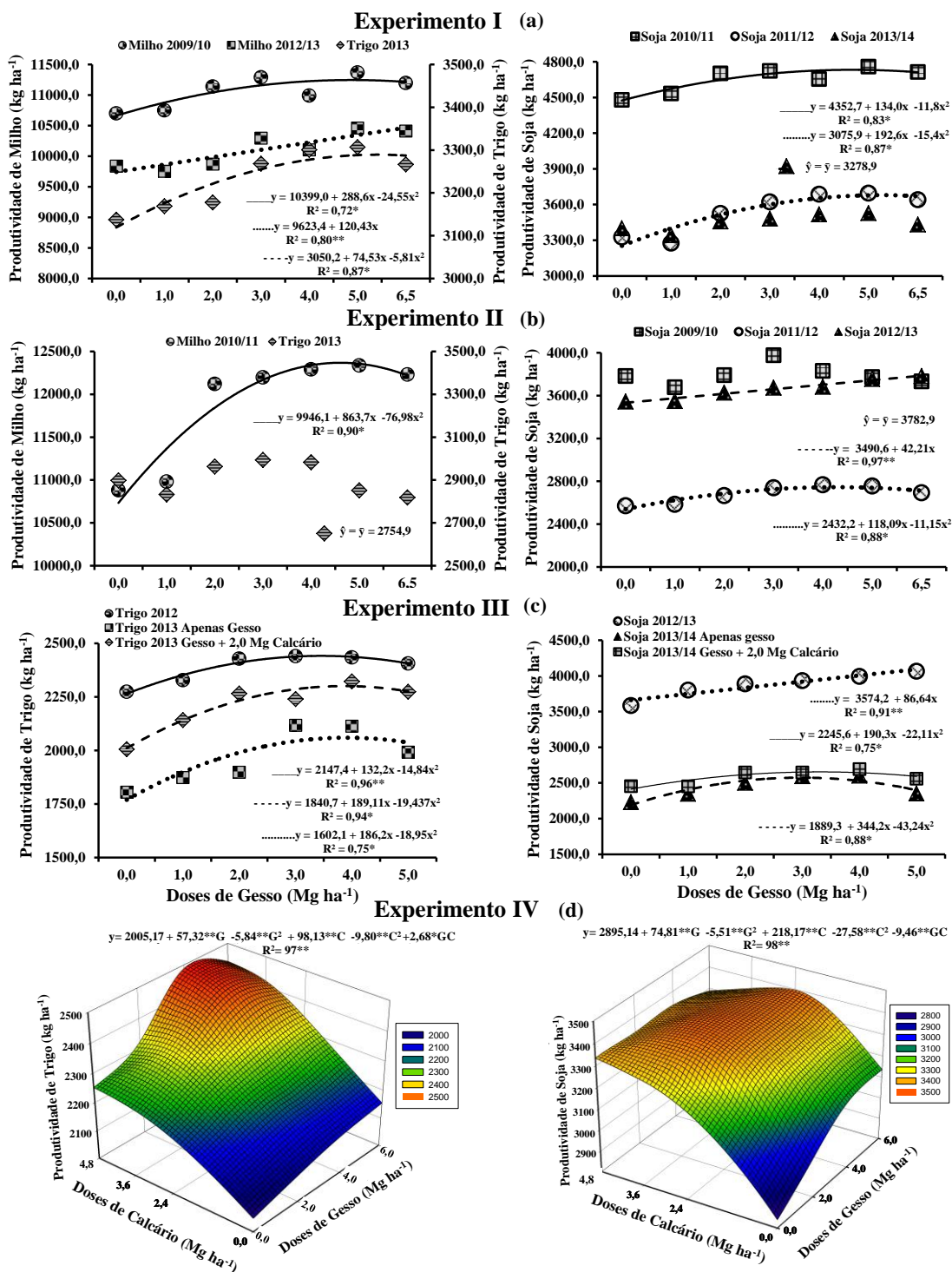


Figura 7: Produtividade da soja, milho e trigo para o Experimento I (a), Experimento II (b), Experimento III (c) e Experimento IV (d) em relação às doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.

Analisando as produtividades acumuladas entre todos os cultivos em cada Experimento foram encontrados ajustes quadráticos, positivos e significativos para os quatro experimentos investigados (Tabela 3). Para o Experimento I, a máxima produtividade acumulada de 36826 kg ha⁻¹ foi atingida com a dose de 5,8 Mg ha⁻¹ de gesso no período de 54 meses de avaliação do experimento (seis cultivos avaliados). O incremento médio obtido com essa dose, de acordo com a equação ajustada foi de 7% ou 2223 kg ha⁻¹ em relação ao tratamento testemunha. Já para o Experimento II, a máxima produtividade acumulada, de acordo com a equação ajustada, foi de 25626 kg ha⁻¹ para a dose de 4,6 Mg ha⁻¹ de gesso durante os 54 meses de avaliação do experimento (cinco cultivos avaliados), representando incremento de 9,5% ou 2230 kg ha⁻¹ em relação ao tratamento testemunha. Para o Experimento III, a máxima produtividade acumulada foi de 11225 kg ha⁻¹ para a dose de 3,8 Mg ha⁻¹ de gesso, o que representa incremento de 12% ou 1158 kg ha⁻¹ em relação ao tratamento testemunha (quatro safras avaliadas).

Já para o Experimento IV, a máxima produtividade acumulada de 5786 kg ha⁻¹ foi atingida com a combinação de 4,2 Mg ha⁻¹ de calcário e 5,8 Mg ha⁻¹ de gesso, representando incremento de 18% ou 886 kg ha⁻¹ em relação ao tratamento testemunha (Tabela 4). Com as doses isoladas de gesso foi encontrada a máxima produtividade de 5283 kg ha⁻¹ para a dose de 5,8 Mg ha⁻¹, representando 7% de incremento em relação à testemunha; já para os tratamentos que receberam doses de calcário isoladas, a máxima produtividade foi de 5569 kg ha⁻¹ na dose de 4,2 Mg ha⁻¹, representando incremento de 12% em relação ao tratamento testemunha. Explorando a interação entre o gesso e o calcário, a partir da equação binomial ajustada, com a aplicação de 3,0 Mg ha⁻¹ de calcário + 2,0 Mg ha⁻¹ de gesso (doses frequentemente usadas pelos agricultores de forma empírica), seria alcançada a produtividade máxima de 5690 kg ha⁻¹ de grãos, o que representaria incremento de 14% em relação à testemunha, considerando que a área em questão, de acordo com os parâmetros da CQFS-RS/SC (2004). Os resultados obtidos reforçam que a formação do gradiente de qualidade química na camada de enraizamento deve merecer a atenção especial dos produtores sob SPD.

Os efeitos mais pronunciados no aumento da produtividade das culturas pela melhoria química da CE ocorreram nos Experimentos 3 e 4 (Tabela 3), sendo essas as áreas que apresentavam maiores restrições químicas em subsuperfície (Tabela 1), reiterando a importância da formação da camada de enraizamento quimicamente corrigido que permita o acesso da água e nutrientes pelas raízes (COLEMAN; THOMAS, 1967; REEVE; SUMNER, 1972; RITCHEY, 1980, 1982; SHAINBERG et al., 1989; SUMNER, 1995; FARINA, 1997;

FARINA et al., 2000; DALLA NORA et al., 2014a). Nota-se ainda que no Experimento IV houve o mais elevado incremento na produtividade entre as demais áreas experimentais, evidenciando que o uso de calcário e gesso em um ambiente quimicamente corrigido pela aplicação de calcário aplicado em superfície sob SPD não deve ser negligenciada.

Tabela 3: Produtividade acumulada de seis safras para o Experimento I, cinco safras para o Experimento II, quatro safras para o Experimento III e duas safras para o Experimento IV.

Produtividade Acumulada (Mg ha ⁻¹)					
-----Experimento I-----		-----Experimento II-----		-----Experimento III ⁺ -----	
Gesso (Mg ha ⁻¹)	Produção Acumulada	Gesso (Mg ha ⁻¹)	Produção Acumulada	Gesso (Mg ha ⁻¹)	Produção Acumulada
0,0	34882,0	0,0	23673,0	0,0	10107,0
1,0	34825,0	1,0	23620,0	1,0	10537,0
2,0	35871,0	2,0	25165,0	2,0	10972,0
3,0	36682,0	3,0	25578,0	3,0	11172,0
4,0	36255,0	4,0	25550,0	4,0	11292,0
5,0	37120,0	5,0	25469,0	5,0	11061,0
6,5	36663,0	6,5	25254,0		
Efeito					
y = 34603,0 + 771,8x - 67,0x ² R ² =0,85* (Experimento I)		y = 23396,0 + 967,1x - 105,4x ² R ² =0,86* (Experimento II)		y = 10068,0 + 614,7x - 81,6x ² R ² =0,98** (Experimento III)	
----- Experimento IV ^{&} -----					
Gesso (Mg ha ⁻¹)	Calcário (Mg ha ⁻¹)				
	0,0	2,4	3,6	4,8	
0,0	4927,0	5433,0	5534,0	5586,0	
2,0	5083,0	5647,0	5730,0	5651,0	
4,0	5252,0	5711,0	5837,0	5824,0	
6,0	5289,0	5742,0	5770,0	5726,0	
Efeito					
y = 4900,3 + 132,1**G - 11,4**G ² + 316,3**C - 37,4**C ² - 6,8GC* R ² =0,98* (Experimento IV)					

⁺Para o Experimento III foi realizada a média entre as produtividades nos tratamentos que receberam gesso isoladamente e combinado com calcário; * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro. [&]Houve interação significativa entre as doses de gesso e calcário para a produtividade a 5% de probabilidade de erro

3.4.5. Relações com a produtividade

Analisando conjuntamente as safras em todos os Experimentos e para cada cultura separadamente, foi constatado ajuste quadrático e significativo entre as doses de gesso e a produtividade relativa da soja, trigo e milho (Figura 8). Para a cultura da soja foi verificado que a dose de gesso que promoveu a máxima produtividade relativa de 98,8% foi de 4,7 Mg ha⁻¹, enquanto o tratamento testemunha atingiu 92,2% da produtividade relativa (Figura 8a). Para a cultura do trigo, a máxima produtividade relativa de 98,8% foi atingida com a dose de 4,5 Mg ha⁻¹ de gesso, enquanto o tratamento testemunha atingiu 90,1% da produtividade relativa, de acordo com a equação ajustada (Figura 8b). Já para a cultura do milho a dose que proporcionou a máxima produtividade relativa de 99,5% foi de 5,5 Mg ha⁻¹, enquanto o tratamento testemunha atingiu a produtividade relativa de 91,3% (Figura 8c). Nota-se que as culturas do milho (8,2%) e do trigo (8,7%) apresentaram maior incremento na produtividade relativa em relação a testemunha quando comparadas com a cultura da soja (6,6%). Esse resultado foi reportado por diversos autores (FARINA, 1997; FARINA et al., 2000; CAIRES, 2013; CAIRES et al., 2004, 2005; SOUZA et al., 2012; DALLA NORA; AMADO, 2013; PAULETTI et al., 2014), sendo que as culturas de milho e trigo apresentam maior resposta a gessagem do que a soja, pelo efeito da redução na saturação por Al e aumento dos teores de Ca em profundidade. A resposta superior das culturas de milho e trigo deve-se ao fato das poáceas apresentarem raízes com CTC radicular mais baixa que leguminosas como é o caso da soja. Plantas de milho e trigo apresentam CTC radicular entre 100 a 200 mmol (+) kg⁻¹ de matéria seca de raízes, enquanto que plantas leguminosas como soja apresentam CTC radicular entre 400 a 800 mmol (+) kg⁻¹ de matéria seca de raízes (FERNANDES; SOUZA, 2006). Raízes com mais alta CTC acumulam íons bivalentes ao contrário de raízes com mais baixa CTC que absorvem com maior eficiência íons monovalentes (BROYER; STOUT, 1959). Dessa maneira, as poáceas são menos eficientes do que as fabáceas na absorção de Ca da solução do solo. Portanto, a absorção de Ca pelas poáceas, como o milho e o trigo, pode ser favorecida pelo aumento de Ca proporcionado pela aplicação de gesso (CAIRES et al., 2004).

Não foi observada relação significativa entre a produtividade relativa das culturas e o tempo de aplicação do gesso e calcário, sugerindo que os tempos máximos de avaliação para este estudo ainda seguem apresentando os efeitos positivos desses insumos sobre a

produtividade das culturas (Figuras 3, 4, 5, 6). Resultados semelhantes foram reportados por Pauletti et al. (2014), sendo que os autores observaram resultados de incremento da produtividade das culturas, 50 meses após a aplicação de calcário e gesso. Farina et al. (2000) observou incrementos de $135 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na média de 10 safras com aplicação de gesso. Caires et al. (2011b) encontrou aumentos lineares e significativos da produtividade do milho ($p < 0,01$) 10 anos após a aplicação de doses entre $0,0$ e $9,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso em um Latossolo sob SPD.

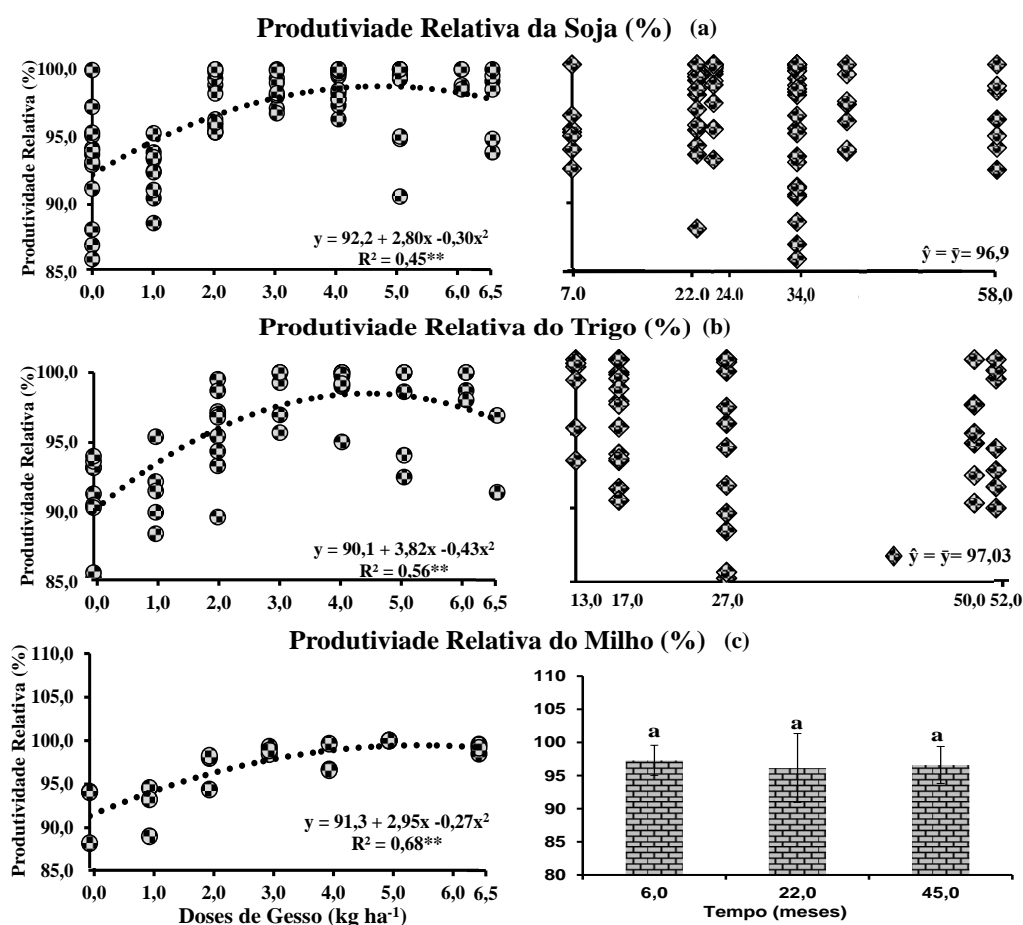


Figura 8: Relação entre a produtividade relativa de soja (a), trigo (b) e milho (c) para todos experimentos em conjunto com as doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário e tempo de avaliação. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro. Letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na Figura 9 foram apresentadas as relações significativas ($p < 0,05$ e $p < 0,01$) entre as produtividades relativas acumuladas de soja, milho e trigo para cada experimento em relação aos atributos químicos do solo em cada camada amostrada. Na área do Experimento I (Figura

9a) foi verificada relação linear positiva ($p < 0,01$) entre a saturação por bases e a produtividade relativa, e efeito linear negativo ($p < 0,01$) entre a saturação por Al e a produtividade relativa, na camada de 0,25-0,40 m. Foi observado nesse Experimento que até a profundidade de 0,15-0,25 m a qualidade química do solo era satisfatória, no entanto, a partir da camada de 0,25-0,40 m, o solo apresentava valores baixos de saturação por bases e altos de saturação por Al (Tabela 2). Dessa forma, os maiores impedimentos químicos encontrados pelo sistema radicular ocorreram na camada de 0,25-0,40 m, sendo que os valores de saturação por bases e de saturação por Al que proporcionaram a máxima produtividade relativa acumulada foram de 59,0% e 2,9%, respectivamente. Resultados semelhantes foram anteriormente reportados por Dalla Nora e Amado (2013), em que os autores propuseram que as máximas produtividades das culturas de milho e soja foram encontradas quando a saturação por Al foi reduzida abaixo de 10% e a saturação por bases aumentada a valores superiores a 50% na camada de 0,25-0,40 m em dois latossolos do RS.

O solo do Experimento II apresentava reduzida concentração de Al até a profundidade de 0,40 m (zona de desenvolvimento radicular) (Tabela 2). Mesmo assim, foi verificada relação quadrática positiva ($p < 0,01$) entre a saturação por bases e a produtividade relativa, e relação linear negativa ($p < 0,01$) entre a saturação por Al e a produtividade relativa na camada de 0,00-0,40 m (Figura 9b). A máxima produtividade relativa foi encontrada quando a saturação por bases e a saturação por Al atingiram 70,5% e 0,2%, respectivamente, para a camada em questão.

No solo do Experimento III, onde a acidez era mais alta na camada superficial do solo (0,00-0,05 m) (Tabela 2), foi verificado efeito linear e positivo ($p < 0,01$) entre a saturação por bases e a produtividade relativa, e efeito linear e negativo ($p < 0,01$) entre a saturação por Al e a produtividade (Figura 9c) na camada de 0,00-0,10 m (média ponderada entre as camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m). A saturação por bases que resultou na maior produtividade relativa foi de 57,3% e a saturação por Al foi de 5,5%, nota-se que esta última é inferior ao limite crítico estabelecido pela CQFS-RS/SC (2004) (10% de saturação por Al na camada de 0,00-0,10 m) (Figura 9c).

O solo do Experimento IV (Figura 9d) apresentava índices de saturação por bases acima e de saturação por Al abaixo dos limites críticos propostos pela CQFS-RS/SC (2004) na camada de 0,00-0,10 (Tabela 2). Contudo foi verificado efeito quadrático positivo ($p < 0,01$) entre a saturação por bases e a produtividade relativa, e efeito linear negativo ($p < 0,05$) entre a saturação por Al e a produtividade relativa na camada de 0,00-0,25 m (média

ponderada entre as camadas que compõe essa profundidade). A saturação por bases e a saturação por Al que atingiram a máxima produtividade relativa acumulada foram de 63,1% e 5,6%, respectivamente, para a camada de 0,00-0,25 m. Vieira et al. (2013), avaliando o desempenho de culturas da soja e milho em Latossolos do Paraná, observaram que o nível crítico da saturação por bases foi de 60% na camada de 0,00-0,20 m proporcionou produtividade próxima do máximo retorno econômico.

Os níveis de saturação por bases e de saturação por Al observados nesse estudo, bem como as camadas diagnósticas correlacionadas com a produtividade, são, em sua maioria, superiores as preconizados pela CQFS-RS/SC (2004). Contudo, estão de acordo com os resultados observados por Raij et al. (1997) para o Estado de São Paulo e Nicolodi et al. (2008) para o Estado do RS, onde os autores sugeriram a saturação por bases de 60% na camada de 0,00-0,20 m como limite crítico para as culturas em SPD.

Resultados semelhantes aos encontrados nesse estudo foram verificados por Caires et al. (2000) em um Latossolo do Paraná, em que os autores propuseram que a máximo retorno econômico em cinco anos para as culturas da soja, milho e trigo foram alcançados quando a saturação por bases foi calculada para alcançar 65%, na camada de 0,00-0,20 m. Já, Caires et al. (2005) observaram que a saturação por bases calculada para 70% na camada de 0,00-0,20, resultou no maior retorno econômico para o período de 10 anos.

De acordo com os resultados apresentados no presente estudo, nota-se que o aumento da produtividade em SPD é inicialmente dependente da melhoria das condições superficiais do solo (Figura 9c). Posteriormente, a melhoria química de uma camada um pouco mais profunda (0,00-0,25 m) é fundamental para atingir melhores resultados de produtividade. Quando a camada de enraizamento mais profunda é corrigida (camadas até 0,40 m), os tetos de produtividade são maximizados (Figura 7a, 7b).

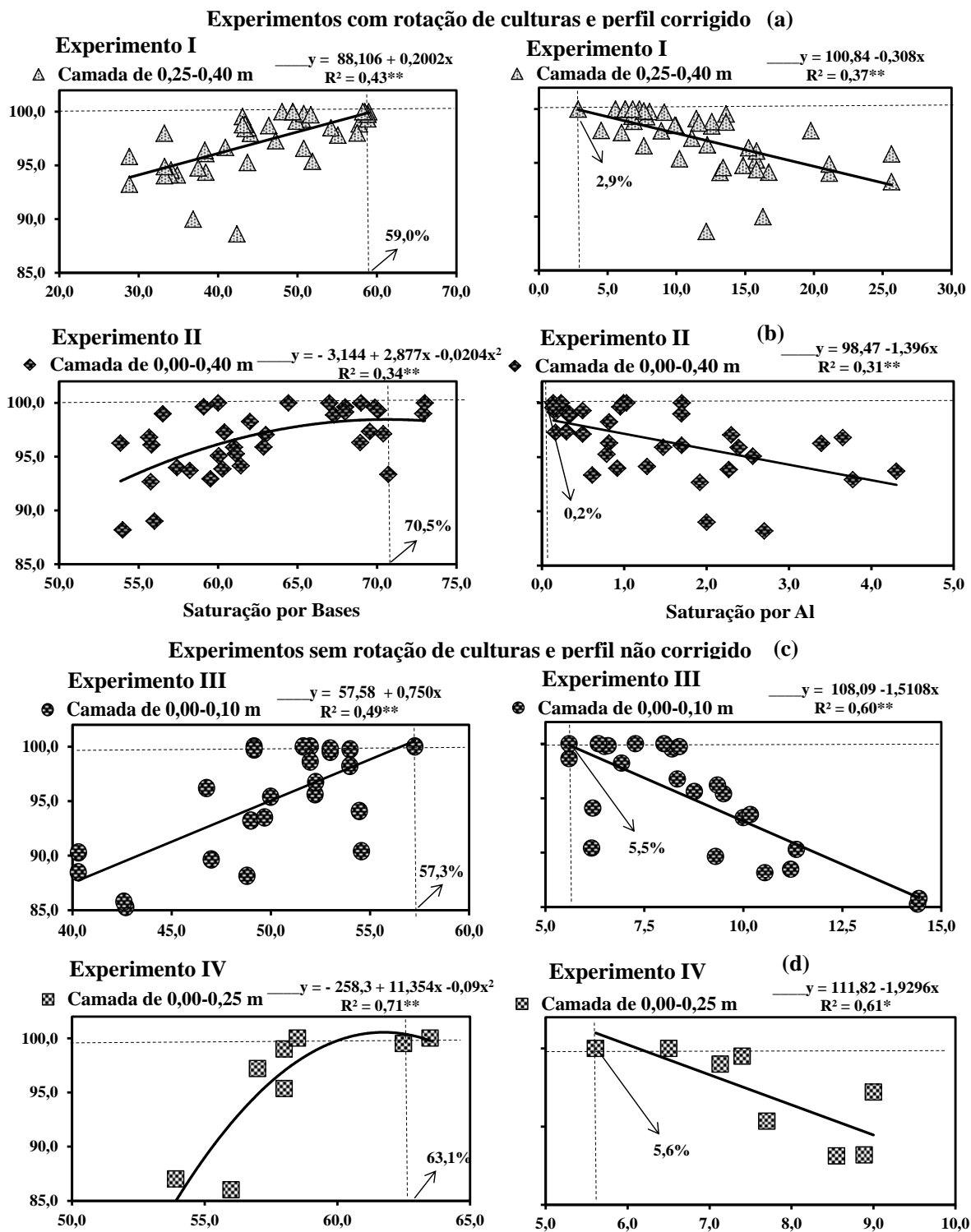


Figura 9: Relação entre a produtividade relativa de soja e trigo e a saturação por bases e a saturação por Al na camada de 0,00-0,10 m para o Experimento III (a); entre a produtividade relativa de soja e trigo e a saturação por bases e a saturação por Al na camada de 0,00-0,25 m para o Experimento IV; entre a produtividade relativa de soja, milho e trigo com a saturação por bases e a saturação por Al na camada de 0,25-0,40 m para o Experimento I (c); entre a produtividade relativa de soja, milho e trigo e a saturação por bases e a saturação por Al na camada de 0,00-0,40 m para o Experimento II (d). Para as profundidades que não foram amostradas, foi realizada a média ponderada das camadas que a compõe.

3.5. Conclusões

Com a aplicação de gesso foi verificado aumento dos teores de Ca em a camada de enraizamento e aumento dos teores de S nas camadas mais profundas. O maior efeito da melhoria da qualidade química causada pelo gesso foi constatado em um período superior a 30 meses. O efeito de melhoria da qualidade química persistiu até de 54 meses após a aplicação dos tratamentos.

A produtividade de soja, trigo e milho foi afetada positivamente pela melhoria da qualidade química da camada de enraizamento, proporcionada pela combinação do gesso ao calcário. Neste caso, a combinação dos insumos foi superior ao efeito isolado de cada um deles.

As doses de gesso que proporcionaram as maiores produtividades de grãos foram de 4,7 Mg ha⁻¹ para a soja, 4,5 Mg ha⁻¹ para o trigo e 5,5 Mg ha⁻¹ para o milho. Para os experimentos em que havia rotação de cultura durante o verão, as profundidades de amostragem em que houve relação entre a produtividade com a saturação por bases e saturação por Al localizavam-se em maiores profundidade (camada de 0,25-0,40 m para o Experimento I) ou era formada por ma camada de enraizamente profunda (camada de 0,00-0,40 m para o Experimento II). Já, para os experimentos em que não havia rotação de cultura no veãro as profundidades de amostragem que apresentaram relação com a produtividade situavam-se mais próximas da superfície (camada de 0,00-0,10 m para o Experimento III e camada de 0,00-0,25 m para o Experimento IV). Sugerindo que os parâmetros e camadas amostrais não correspondem ao preconizado pela CQFS-RS/SC (2004).

3.6. Referências Bibliográficas

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Chemical attributes of a cerrado Oxisol under no-tillage as affected by lime application methods and doses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 923-934, 2005.

AMADO, T. J. C. et al. Chemical and physical attributes of Oxisols and their relation with irrigated corn and common bean yields. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 831-843, 2009.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 72, p. 693-701, 2008.

BEATON, J. D.; BURNS, G. R.; PLATOU, J. **Determination of sulphur in soils and plant material**. Tech. Bull. . 1968. p. 14. Sulphur Inst., Washington, DC.

BLUM, B. S. et al. Assessing available soil sulphur from Phosphogypsum applications in a no-till Cropping system. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 50, n. 4, p. 515-532, 2014.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 262-271, 2014.

BROYER, T. C.; STOUT, P. R. The macronutrient elements. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 10, p.277-300, 1959.

CAIRES E. F. et al. 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**, Viçosa, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E. F. Calagem e uso de gesso em Sistema Plantio. **Revista Plantio Direto**, Não-Me-Toque, v. 128, p. 1-11, 2012.

CAIRES, E. F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto**. International Plant Nutrition Institute (IPNI). 2013. 14p. (Informações Agronômicas, 141)

CAIRES, E. F. et al. Changes in soil chemical properties and corn response to lime and gypsum applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 125-136, 2004.

CAIRES, E. F. et al. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 357-364, 2002.

CAIRES, 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**, Viçosa, v. 23, p.315-327, 2000.

CAIRES, E. F. et al. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, Madison, v. 24, p. 302-309, 2008.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 791-798, 2005.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, p. 209-216, 2011b.

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**, Madson, v. 27, p. 45–53, 2011a.

COLEMAN, N. T.; THOMAS, G. W. The basic chemistry of soil acidity. In: PEARSON, R. W.; ADAMS, F. Soil acidity and liming. **American Society of Agronomy**, Madson, v. 2, p. 1-41. 1967.

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**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. **Agronomy Journal**, Madson, v. 105, p. 1393-1403, 2013.

DALLA NORA, D. et al. Gesso: Alternativa para redistribuir verticalmente nutrientes no perfil do solo sob sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Não-Me-Toque, v. 133, p. 8-20, 2013.

DALLA NORA, D. et al. Formação de um perfil de enraizamento profundo e a estabilidade da produtividade de culturas de grãos sob Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, Não-Me-Toque, v. 139, p. 1-11, 2014a.

DALLA NORA, et al. Subsoil chemical amelioration and crop yields under contínuos long-term no-till in a subtropical Oxisol. **African Journal of Agricultural Research**, Gauteng, v. 9, n. 45, p. 3338-3349, 2014b.

DEBARBA, L.; AMADO, T. J. C. Desenvolvimento de sistemas de produção de milho no sul do Brasil com características de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 473-480, 1997.

EMBRAPA. **Avaliação dos impactos do uso do gesso agrícola na cultura da soja em algumas áreas do Cerrado**. Embrapa Cerrados, Planaltina, 2010.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 2nd ed. Embrapa - CNPS, Rio de Janeiro, 2006.

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, 2001.

FARINA, M. P. W. Management of subsoil acidity in environments outside the humid tropics. p. 179–190. In: Moniz, A. C. et al. (ed.) Plant–soil interactions at low pH: Sustainable agriculture and for estry production. **Brazilian Soil Science Society**, Campinas, Brazil. 1997.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Long-term growth effects. **Soil Science Society of American Journal**, Madson, v. 64, p. 646-651, 2000.

FAVARETTO, N. et al. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium effects on plant nutrition under conditions of intensive nutrient extraction. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 133, p. 108-118, 2008.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. **Absorção de nutrientes**. In: FERNANDES, M.S. (Ed.) Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 115-153.

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**, Viçosa, v. 30, p. 425-432, 2006.

FONTES, M. P. F. et al. Nível crítico de enxofre em Latossolos e recuperação do sulfato adicionado por diferentes extratores químicos, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 6, p. 226-230, 1982.

HAWKESFORD, M. et al. **Functions of macronutrients**. In: MARSCHNER, P., ed. Mineral nutrition of higher plants, 3.ed. New York, Elsevier, 2012. p.171-178.

HERNANDEZ, M. R. J.; SILVEIRA, R. I. Efeitos da saturação por bases, relações ca:mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (*Zea mays* L.). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p.79-85, 1998.

KÖPPEN, W. P. **Das geographic system der climate**. In: W. Köppen and R. Geiger, editors, *Handbuch der Klimatologie*. C.G. Borntrager, Berlin. 1938. p. 1-44.

LUIZ, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N.; ARENAS-TOLEDO, J. M. A.; GOLTZ, E.; BRANDÃO, D. Estimativa amostral objetiva de área plantada regional, apoiada em imagens de sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1279-1287, 2012.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 45, p. 251-256, 2002.

NAVA, G. et al. Soil Composition and nutritional status of apple as affected by long-term application of gypsum. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 215-222, 2012.

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**, Viçosa, v. 32, p. 237-247, 2008.

NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 655-663, 2003.

O'BRIEN, L. O.; SUMNER, M. E. Effects of phosphogypsum on leachate and soil chemical composition. **Communication in Soil Science Plant and Analysis**, Madison, v. 19, p. 1319-1329, 1988.

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

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, C. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.329-335, 2001.

PAULETTI, V. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495-505, 2014.

QUAGGIO, J. A. et al. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, p.375-383, 1993.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. V. **Correção da acidez do solo**. In: Raij, B. V.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Furlani, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, p.14-19. 1996. (*Boletim Técnico*, 100).

RAIJ, B. VAN. Gesso na agricultura. São Paulo: IPNI – **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. 2010. (Informações Agrônomicas 122).

RAIJ, B.VAN. et al. Efeito de calcário e de gesso para soja cultivada em Latossolo Roxo ácido saturado com sulfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, p. 305-312, 1994.

RAIJ, B.va, et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (*Boletim Técnico*, 100).

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1687-1698, 2011.

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

RITCHEY, K.D. et al. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, Madson, v. 72, p. 40-44, 1980.

RITCHEY, K. D.; SILVA, S. E.; COSTA, V. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 133, p. 378- 382, 1982.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R. Efeitos da calagem e gessagem na produção de algodão e na lixiviação de bases em dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 103-109, 1984.

SÁ, J. C. M. et al. Gestão da matéria orgânica e da fertilidade do solo visando sistemas sustentáveis de produção In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R., eds. **Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2010, p. 383-420.

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.

SAS - SAS INSTITUTE. **SAS/SAT: User's Guide**: version 9.2. Cary, 2009. 1848p.

SCHWALBERT, R. A. et al. Zonas de manejo: atributos de solo e planta visando a sua delimitação e aplicações na agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, v. 2, p. 21-32, 2014.

SHAINBERG, I. et al. Use of gypsum on soils. **Advances in Soil Science**, Madson, v. 9, p. 1-111, 1989.

SILVA, C. E. M. et al. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 36, p. 503-512. 2006.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. Natural Resources Conservation Service. 11ed, Washington. 2010. 338p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Embrapa Cerrados. 2002. Planaltina, DF, Brazil.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E., eds. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.81-96.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. **Uso do gesso agrícola nos solos dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA CPAC, 1996. p.20. (Circular Técnica n. 32).

SOUZA, F. G. et al. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1717-1732, 2012.

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

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre, Artmed, 2009. 819p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico n. 5).

VIEIRA, R. C. B. 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**, Viçosa, v. 37, p. 188-198, 2013.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Liming and ionic speciation of an Oxisol under no-till system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 190-203, 2008.

4. ARTIGO II - MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DE DÉFICITS HÍDRICOS DE CURTA DURAÇÃO PELA MELHORIA QUÍMICA DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

4.1. Resumo

A inferior qualidade química das camadas subsuperficiais em sistema plantio direto (SPD) tem resultado na instabilidade da produtividade das culturas agrícolas em anos de déficit hídrico no Sul do Brasil. O presente estudo teve o objetivo de avaliar o efeito da melhoria química da CE sobre a produtividade das culturas agrícolas em SPD sob condições de déficit hídrico induzido. Foram realizados quatro experimentos em Latossolos distróficos sob SPD do RS. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. Dois experimentos foram implantados em 2009 em Carazinho com tratamentos variando de 0,0 a 6,5 Mg ha⁻¹ de gesso. Em um deles, as parcelas foram divididas em duas subparcelas sem e com restrição de 30% da precipitação pluvial a partir da implantação de câmaras de exclusão. Outros dois experimentos foram implantados em São Miguel das Missões e Tupanciretã em 2011. Em São Miguel das Missões utilizou-se um delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, sendo as parcelas principais compostas por doses de gesso variando de 0,0 a 5,0 Mg ha⁻¹, e as subparcelas compostas pelos tratamentos sem calcário na dose de 2,0 Mg ha⁻¹. Em Tupanciretã, o experimento foi composto por um delineamento fatorial 4x4, com quatro doses de gesso variando de 0,0 a 6,0 Mg ha⁻¹, e quatro doses de calcário variando de 0,0 a 4,8 Mg ha⁻¹. As amostragens de solo foram feitas estratificadamente na camada de 0,00-0,60 m. Verificou-se aumento na saturação por bases e redução na Saturação por Al em toda a CE em função das doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário nos quatro experimentos realizados. O incremento na quantidade de grãos produzida por mm de chuva, decorrente da aplicação de gesso, foi maior quando houve déficit hídrico durante o período crítico das culturas, especialmente nas áreas com maior nível de acidez em subsuperfície. A melhoria química da camada de enraizamento do solo proporcionada pela adição de gesso em sistema plantio direto atenuou a perda de produtividade da soja associada à restrição hídrica.

Palavras-chave: Gesso. Calcário. Restrição hídrica. Saturação por Bases

Abreviações: Al – Alumínio; Ca - Cálcio; CQFS-RS/SC – Comissão de Química e Fertilidade do Solo; CTC – Capacidade de Troca de Cátions; F – Fluor; Mg – Magnésio; N – Nitrogênio; P – Fósforo; PRNT – Poder Real de Neutralização do Total; K – Potássio; RS – Rio Grande do Sul; Sat. por Al – Saturação por Alumínio; S – Enxofre; SO_4^{2-} - Sulfato; SPD - Sistema Plantio Direto.

4.2. Introdução

A adoção do sistema plantio direto (SPD) tem proporcionado diversas melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo em diversas regiões agrícolas do Brasil (CONCEIÇÃO et al., 2005; BOLINGER et al., 2007; SÁ et al., 2010). Esse sistema tem apresentado rápido aumento da área cultivada, atingindo 105 milhões de hectares em todo o mundo no ano de 2009 (DERPSCH; FRIEDRICH, 2009). No entanto, recentes estudos sob Latossolos ácidos têm sugerido que a aplicação superficial de adubos e corretivos, associadas ao não revolvimento do solo, tem criado um acentuado gradiente vertical de redução da qualidade química do solo partindo da superfície em direção as camadas mais profundas (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008). Além disso, o elevado aporte de resíduos no SPD complexam o Al da solução do solo de camadas superficiais, diminuindo sua atividade e, conseqüentemente, sua toxidez às plantas (SALET et al., 1999), portanto, em relação ao preparo convencional, para a correção da acidez sob SPD passou-se a utilizar uma dose menor de calcário ajustada a uma camada diagnóstico de 0,00-0,10 m (CQFS-RS/SC, 2004).

Essa redução da qualidade química em camadas subsuperficiais tem representado impedimento ao desenvolvimento radicular (SHAINBERG et al., 1989; FARINA et al., 2000; FOLONI; ROSOLEM, 2006), resultando no uso ineficiente da água armazenada no solo, e assim, predispondo a planta ao estresse hídrico (JORIS et al., 2013), com decréscimo na produtividade das culturas em SPD sob condições de precipitação irregulares ou subótimas (DALLA NORA et al., 2014a; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014; MARENGO et al., 2007). Como consequência prática da presença de um gradiente vertical de qualidade química na camada de enraizamento (CE) tem-se a instabilidade da produtividade, de modo que as

satisfatórias produtividades obtidas em anos de precipitação pluvial normal conduzem a falsa impressão que o problema inexistente (DALLA NORA et al., 2014a).

Déficits hídricos de curta duração têm sido recorrentes durante os cultivos de verão no RS, fato que tem resultado em quebras de safra sofridas pelo Estado, somando nos últimos 10 anos, ao menos quatro quebras de safra, com maior destaque para safras de 2004/05 e 2011/12 que resultaram em reduções de 30,7% e 31,5%, na produção agrícola, respectivamente (EMATER, 2012). Em estudo realizado por Matzenauer et al. (1986), os autores observaram redução de 51% na produtividade de grãos quando a deficiência hídrica ocorre durante o período reprodutivo do milho no RS. Corroborando, Bergamaschi et al. (2004) verificaram que o milho tem elevada sensibilidade ao déficit hídrico entre os estádios do florescimento ao início da formação de grãos. Destaca-se ainda, que a cultura do milho é mais sensível a acidez quando a umidade do solo é reduzida (FREIRE, 1984).

Em relação à cultura da soja, Bergamaschi et al. (1989) verificaram que no ano agrícola de 1990/91 (muito seco) a produtividade média no RS foi de 1100 kg ha⁻¹, enquanto que no ano seguinte (1991/92), praticamente com a mesma tecnologia, porém com maior quantidade e melhor distribuição de chuvas, a produtividade média atingiu 2700 kg ha⁻¹. Para a cultura do trigo, maiores reduções de produtividade foram verificadas quando houve redução de precipitação no período do emborrachamento ao enchimento de grãos (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). No entanto, para a região Sul, o trigo é cultivado em uma época do ano em que a precipitação pluvial excede, muito, a evapotranspiração da cultura, de forma que reduções na produtividade do trigo por conta de déficit hídrico são de baixa probabilidade de ocorrência no RS (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Técnicas de manejo que melhorem a qualidade química da camada de enraizamento têm sido propostas como alternativa a mitigação do efeito do déficit hídrico devido a maior eficiência no uso da água armazenada no solo (CAIRES, 2012; DALLA NORA et al., 2014a). Dentre essas técnicas, o uso isolado do gesso ou combinado com calcário, além do uso frequente do calcário mesmo em solo já corrigido, tem sido proposto (JORIS et al., 2013; DALLA NORA; AMADO, 2013). Enquanto o calcário eleva os teores de Ca e Mg na superfície do solo, o gesso (mais solúvel), se dissocia liberando Ca e SO₄²⁻ (RAIJ, 2010). Com isso, há rápida movimentação do SO₄²⁻ para a subsuperfície, favorecendo a descida de cátions como o Ca, Mg e, em menor quantidade, K (RAIJ, 2010). Além disso, em subsuperfície o Ca

desloca o Al para a solução do solo favorecendo a formação do complexo $AlSO_4^+$ com reduzido efeito tóxico às plantas (NAVA et al., 2012; MALAVOLTA et al., 1997).

Estudos realizados por Caires et al. (2005; 2011; 2013), Souza et al. (2012), Dalla Nora e Amado (2013), Blum et al (2014) e Pauletti et al (2014), revelaram que a melhoria química da camada de enraizamento em Latossolos manejados sob SPD promoveu incremento na produtividade, especialmente em condições de déficit hídrico. Devido aos escassos estudos no RS envolvendo o uso do gesso combinado ao calcário sob SPD consolidado, o presente estudo teve o objetivo de avaliar o efeito da melhoria química da CE sobre a produtividade das culturas agrícolas em SPD sob condições de déficit hídrico induzido.

4.3. Material e Métodos

4.3.1. Descrição das áreas de estudo

Foram selecionados quatro Latossolos com distintos históricos de rotação de culturas e qualidade química inicial da camada de enraizamento dispostos em três municípios do RS para implantação dos experimentos. Dois experimentos, considerados de longa duração (cinco anos), implantados no ano de 2009 no município de Carazinho - RS. O Experimento I está localizado nas coordenadas de 28°19'S e 52°55'W, altitude de 595 m com precipitação anual de 1821 mm e temperatura média anual de 16,0°C. O Experimento II localiza-se nas coordenadas de 28°17'S e 52°47'W, altitude de 617 m com precipitação pluvial anual de 1821 mm e temperatura média anual de 16,0°C. Outros dois experimentos, considerados de curta duração (três anos) foram implantados no ano de 2011 nos municípios de São Miguel das Missões - RS (Experimento III) e Tupanciretã - RS (Experimento IV). O terceiro experimento foi implantado em São Miguel das Missões nas coordenadas de 28°40'S e 54°23'W, altitude de 265 m com precipitação pluvial anual de 1651 mm e temperatura média anual de 15,0°C. O quarto experimento foi implantado em Tupanciretã nas coordenadas de 29°00'S e 53° 94'W, altitude de 507 m com precipitação anual de 1766 mm e temperatura média anual de 17,0°C. Em todos os Experimentos, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho

Distrófico típico (Typic Hapludox - Soil Survey Staff (2010)) com textura argilosa (EMBRAPA, 2006). Segundo Köppen (1938) o clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa). A precipitação durante o período experimental, bem como as principais avaliações realizadas no solo e nos cultivos estão representadas na Figura 1.

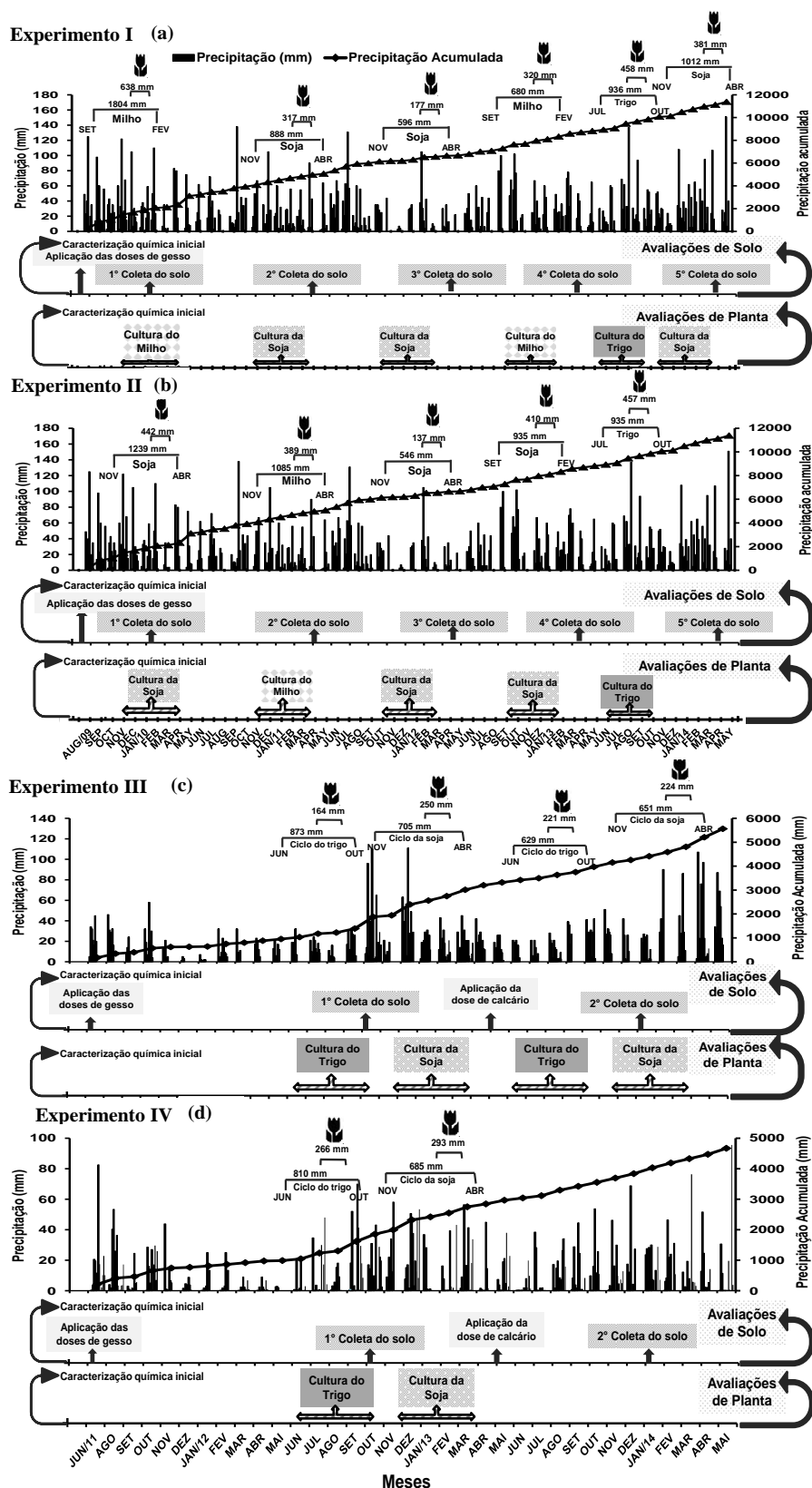


Figura 1: Precipitação pluvial diária e acumulada durante o período experimental para os Experimentos I, II, III e IV, situados em Carazinho, Carazinho, São Miguel das Missões e Tupãnciretã, respectivamente. Além dos cultivos e amostragens de solo e planta realizadas nos respectivos Experimentos. Fonte: INMET.

Anteriormente a implantação dos experimentos, as áreas vinham sendo manejadas sob SPD há mais de 15 anos, recebendo doses próximas a $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário com PRNT de 75% espaçadas em intervalos de 4 a 5 anos. Todos os Experimentos foram cultivadas com a cultura da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), a qual foi quimicamente manejada com glyphosate [*N*-(phosphonomethyl)glycine]. Posteriormente, foi realizada a aplicação manual e de forma homogênea das doses de gesso isoladamente na superfície do solo no mês de agosto de 2009 para os Experimentos I e II considerados de longa duração. Para os Experimentos 3 e 4 considerados de média duração, a aplicação das doses de gesso combinado ao calcário foi realizada no mês de agosto de 2011. As câmaras de exclusão de precipitação foram instaladas no Experimento I nos anos agrícolas de 2011/12 e 2013/14.

A sequência de cultivos para os quatro Experimentos, bem como o ciclo das culturas, adubação efetuada e avaliações realizadas estão apresentados na Tabela 1. Em resumo, a sequência de cultivos nas áreas experimentais foi a seguinte: Experimento I - milho/trigo/soja/aveia preta/soja/aveia preta/milho/trigo/soja; Experimento II - soja-aveia preta-milho-aveia preta-soja-aveia preta-soja-trigo-soja; Experimento III - aveia preta-soja-trigo-soja-trigo-soja, no entanto as avaliações de produtividade passaram a ser realizadas a partir do primeiro cultivo de trigo no ano de 2012; Experimento IV - aveia preta-soja-trigo-soja-aveia preta-soja, no entanto as avaliações de produtividade passaram a ser realizadas no primeiro cultivo de trigo no ano de 2012. De modo geral, o primeiro Experimento apresenta uma rotação mais intensa (3 cultivos de soja para 2 de milho), seguido do segundo (3 cultivos de soja para 1 de milho) e o terceiro e quarto (com rotação só no inverno e monocultura de soja). Estes sistemas de cultura representam os principais sistemas adotados no RS.

Tabela 1: Sequência de cultivos realizados nos Experimentos I, II, III e IV, além do ciclo das culturas, adubação utilizada e época da avaliação da produtividade.

Experimento I			
Cultivos	Ciclo	Adubação	Avaliação de produtividade
Aveia preta	Maio à Set. de 2009	Sem adubação	Implantação do experimento.
Milho	Set.-2009/Fev.-2010	190 kg ha ⁻¹ de N (20 kg ha ⁻¹ na base e 170 kg ha ⁻¹ em cobertura), 120 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ e 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O	Avaliada em Fevereiro de 2010 Não foi colhido devido à geada na floração
Trigo	Jul. à Nov. de 2010	230 kg ha ⁻¹ da fórmula 5-25-25 e 45 kg ha ⁻¹ de N	Avaliada em abril de 2011
Soja	Nov.2010/Abr.-2011	240 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Cultura de cobertura
Aveia preta	Maio à Out. de 2011	Sem adubação	Avaliada em fevereiro de 2012
Soja	Nov.-2011/abr.-2012	240 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Cultura de cobertura
Aveia preta	Maio à Ago. de 2012	Sem adubação	Avaliada em Fevereiro de 2012
Milho	Set.-2012/Fev.-2013	190 kg ha ⁻¹ de N (20 kg ha ⁻¹ na base e 170 kg ha ⁻¹ em cobertura), 120 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ e 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O	Avaliada em novembro de 2013
Trigo	Jul. à Nov. de 2013	220 kg ha ⁻¹ da fórmula 5-25-25 e 40 kg ha ⁻¹ de N	Avaliada em março de 2014
Soja	Nov.-2013/Mar.-2014	220 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	
Experimento II			
Aveia preta	Maio à set. de 2009	Sem adubação	Implantação do Experimento
Soja	Nov.2009/Abr.-2010	240 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Avaliada em abril de 2010
Aveia/nabo	Maio à Ago. de 2010	Sem adubação	Cultura de cobertura
Milho	Out.-2010/Fev.-2011	190 kg ha ⁻¹ de N (20 kg ha ⁻¹ na base e 170 kg ha ⁻¹ em cobertura), 120 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ e 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O	Avaliada em Fevereiro de 2011
Aveia preta	Maio à Set. de 2011	Sem adubação	Cultura de cobertura
Soja	Nov.-2011/Mar.-2012	240 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Avaliada em março de 2012
Aveia preta	Maio à Set. de 2012	Sem adubação	Cultura de cobertura
Soja	Nov.-2012/Mar.-2013	240 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Avaliada em março de 2013
Trigo	Jul. à Nov. de 2010	220 kg ha ⁻¹ da fórmula 5-25-25 e 40 kg ha ⁻¹ de N	Avaliada em novembro de 2013
Soja	Nov.-2013/Mar.-2014	220 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Não Avaliada por problemas de colheita
Experimento III			
Aveia preta	Maio à Set. de 2011	Sem adubação	Implantação do Experimento
Soja	Nov.-2011/Mar.-2012	210 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Não Avaliada
Trigo	Jul. à Nov. de 2012	210 kg ha ⁻¹ da fórmula 5-25-25 e 40 kg ha ⁻¹ de N	Avaliada em novembro de 2012
Soja	Nov.-2012/Mar.-2013	210 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)N-P-K).	Avaliada em março de 2013
Trigo	Jul. à Nov. de 2013	210 kg ha ⁻¹ da fórmula 5-25-25 e 40 kg ha ⁻¹ de N	Avaliada em novembro de 2013
Soja	Nov.-2013/Mar.-2014	210 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Avaliada em março de 2014
Experimento IV			
Aveia preta	Maio à Set. de 2011	Sem adubação	Implantação do experimento
Soja	Nov.-2011/Mar.-2012	230 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Não Avaliada
Trigo	Jul. à Nov. de 2012	220 kg ha ⁻¹ da fórmula 5-25-25 e 45 kg ha ⁻¹ de N	Avaliada em novembro de 2012
Soja	Nov.-2012/Mar.-2013	220 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Avaliada em março de 2013
Aveia preta	Maio à Set. de 2013	Sem adubação	Cultura de cobertura
Soja	Nov.2013/Mar.-2014	230 kg ha ⁻¹ da fórmula 2-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	Não Avaliada

A fonte de N foi a ureia [CO(NH₂)₂] (45% de N), de P foi superfosfato triplo Ca(H₂PO₄)₂·H₂O (45% of P₂O₅) e de K foi cloreto de potássio (60% de K₂O); Milho (*Zea mays* L.); Trigo (*Triticum aestivum* L.); Soja [*Glycine max* (L.) Merr.]; Nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)

Os cultivares e híbridos usados no estudo foram: Pioneer 3069 nos Experimentos I e II e Dekalb 240 nos Experimentos 3 e 4 para o milho; Nidera 5909 nos Experimentos I e II e Coodetec 235RR nos Experimentos 3 e 4 para soja; Quartzo nos Experimentos I e II e BRS Tarumã nos Experimentos 3 e 4 para o trigo. Estes materiais genéticos também são os mais

representativos dos utilizados atualmente no RS. O milho foi semeado na taxa de 4,0 sementes m^{-1} com um espaçamento entre linhas de 0,50 m; a soja foi semeada na taxa de 12,0 sementes m^{-1} (inoculada com *Bradyrhizobium japonicum*) com um espaçamento entre linhas de 0,50 m; o trigo foi semeado na taxa de 60 sementes m^{-1} espaçadas a 0,20 m.

A caracterização química inicial foi realizada anteriormente à implantação dos experimentos a partir da coleta de cinco sub-amostras tomadas aleatoriamente em cada área experimental nas seguintes profundidades: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,25; 0,25-0,40 e 0,40-0,60 m. Na Tabela 2 foram apresentados os atributos químicos da caracterização inicial analisados de acordo com as metodologias descritas em Tedesco et al. (1995).

Tabela 2. Atributos químicos avaliados antes da implantação dos tratamentos nas quatro áreas experimentais.

Prof.(m)	pH _{H2O}	Al	Ca	Mg	K	CTC _{pH7,0}	P	S	V%	Sat. Al	Argila
		-----cmol _c dm ⁻³ -----					-----mg dm ⁻³ -----		-----%-----		-g kg ⁻¹ -
Experimento I (Carazinho)											
0,00-0,05	5,6	0,0	6,7	3,5	0,18	15,6	28,3	8,6	68,2	0,0	530,0
0,05-0,10	5,6	0,0	6,1	3,5	0,13	14,9	10,1	17,3	67,6	0,0	600,0
0,10-0,15	5,4	0,2	5,4	3,2	0,07	14,8	5,0	12,9	59,9	1,8	670,0
0,15-0,25	5,2	0,4	4,3	3,0	0,05	15,2	2,6	10,8	49,5	4,6	680,0
0,25-0,40	4,9	0,8	2,5	2,6	0,04	15,6	1,1	14,0	34,8	16,1	700,0
0,40-0,60	4,5	0,9	2,1	2,3	0,03	15,3	0,8	15,1	30,9	23,9	740,0
Experimento II (Carazinho)											
0,00-0,05	5,9	0,0	4,9	2,2	0,40	11,6	62,8	16,9	65,6	0,0	240,0
0,05-0,10	5,7	0,0	4,2	2,0	0,36	10,3	27,0	14,5	64,9	0,0	320,0
0,10-0,15	5,7	0,0	3,3	2,0	0,35	9,7	16,6	10,4	59,1	0,0	370,0
0,15-0,25	5,4	0,1	2,6	1,8	0,33	9,4	4,07	8,05	51,4	1,3	460,0
0,25-0,40	5,1	0,4	2,5	1,3	0,25	11,4	2,40	9,6	37,8	8,1	500,0
0,40-0,60	4,8	1,2	1,8	0,7	0,17	12,2	0,97	7,2	22,3	30,9	520,0
Experimento III (São Miguel das Missões)											
0,00-0,05	5,0	0,5	4,5	2,8	0,46	16,2	29,2	4,9	54,4	5,6	420,0
0,05-0,10	4,6	1,2	3,1	3,1	0,23	13,4	6,8	2,3	43,1	15,3	600,0
0,10-0,15	4,3	1,8	1,9	1,2	0,15	14,8	3,6	1,1	27,7	29,9	650,0
0,15-0,25	4,2	2,5	1,5	1,7	0,09	13,2	2,4	6,2	21,0	42,3	770,0
0,25-0,40	4,2	2,4	1,4	1,6	0,06	11,6	1,6	4,7	23,3	43,2	750,0
0,40-0,60	4,2	2,1	1,2	1,4	0,06	11,5	1,8	1,6	23,8	43,3	650,0
Experimento IV (Tupanciretã)											
0,00-0,05	6,2	0,0	6,5	3,5	0,37	12,5	14,7	5,2	82,2	0,0	295,0
0,05-0,10	6,1	0,0	4,7	2,3	0,23	10,5	2,7	5,2	68,4	0,0	335,0
0,10-0,15	5,0	0,5	2,3	2,2	0,15	12,5	10,7	4,2	37,0	9,9	400,0
0,15-0,25	4,7	1,3	1,7	1,8	0,11	13,0	4,0	2,4	28,0	25,7	440,0
0,25-0,40	4,4	2,9	1,4	1,1	0,10	20,0	2,3	5,7	13,4	52,6	500,0
0,40-0,60	4,2	4,3	1,1	0,5	0,08	22,3	0,9	12,1	9,6	66,9	610,0

Al- Alumino, Ca- Cálcio, Mg- Magnésio, K- Potássio, CTC_{pH7,0}- Capacidade de troca de cátions a pH 7,0, P- Fósforo, S- Enxofre, V%- Saturação por bases, Sat. Al- Saturação por Al.

4.3.2. Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado em todos os experimentos foi de blocos ao acaso com três repetições. Cada parcela experimental possuía uma área de 64,0 m², com dimensões de 8,0 x 8,0 m. Os tratamentos investigados nos experimentos I e II foram iguais, constituindo-se das seguintes doses de gesso: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,5 Mg ha⁻¹ aplicados na superfície do solo. Para o Experimento III os tratamentos investigados foram 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso aplicados na superfície do solo. Após 22 meses, em abril de 2013, os tratamentos principais foram subdivididos e as subparcelas foram compostas pelas doses de 0,0 e 2,0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico. O Experimento IV constitui-se de um fatorial 4x4, sendo empregadas quatro doses de gesso: 0,0; 2,0; 4,0 e 6,0 Mg ha⁻¹, e quatro doses de calcário: 0,0; 2,4; 3,6 e 4,8 Mg ha⁻¹ de calcário. As doses de gesso e calcário foram aplicadas simultaneamente na superfície do solo.

O gesso agrícola (CaSO₄.2H₂O) utilizado nos experimentos continha em sua composição 210,0 g kg⁻¹ de Ca, 155,0 g kg⁻¹ de SO₄-S, 0,024 g kg⁻¹ de F e 9,0 g kg⁻¹ de P₂O₅. O calcário dolomítico continha 30% de CaO e 20% de MgO com 75% de PRNT e 85% de reatividade.

4.3.3. Descrição das principais avaliações temporais realizada nas áreas experimentais

Para o Experimento I, as amostragens de solo foram realizadas aos seis, 14, 22, 32, 44 e 56 meses após a aplicação dos tratamentos. No Experimento II as amostragens foram realizadas aos seis, 22, 32, 44 e 56 meses após a aplicação dos tratamentos. Para os Experimentos III e IV as amostragens foram aos 15 e 30 meses após a aplicação dos tratamentos. No Experimento III, a amostragem de solo realizada aos 30 meses recorreu após oito meses da formação das subparcelas com calcário. O solo foi amostrado em três repetições para compor uma amostra de solo nas seguintes profundidades: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,25; 0,25-0,40 e 0,40-0,60 m pela abertura manual de trincheiras com dimensões de 0,3 x 0,3 x 0,6 m. As amostras de solo foram coletadas com uma espátula na parede frontal

da trincheira e foram secas em estufas de ventilação forçada e manipuladas visando à retirada de raízes e resíduos de plantas.

Os atributos químicos foram determinados de acordo com as metodologias descritas em Tedesco et al. (1995). As determinações químicas foram: pH em água (1:1 solo-água), teor de Al extraído com KCl 1 mol L⁻¹ e titulado com NaOH 0,0125 mol L⁻¹, Ca e Mg extraídos com KCL 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, P e K extraídos com solução de Mehlich-I. A concentração de P foi determinada por colorimetria usando molibdato de amônio e o teor de K foi determinado por fotometria de chama. A determinação do teor de S foi realizada a partir da extração com Ca(H₂PO₄)₂CH₂O (500 mg L⁻¹ de P) e posteriormente determinado por turbimetria (BEATON et al., 1968).

Na maturação fisiológica das culturas de milho, soja e trigo, adjacente ao local de coleta de amostras de solo, foram coletadas manualmente amostras para determinação da produtividade. Foram coletados quatro metros lineares das culturas (dois metros em cada linha de semeadura por subparcela), e a massa de grãos foi corrigida para umidade de 13%.

4.3.4. Avaliação da exclusão parcial da precipitação

Com o intuito de avaliar o efeito da melhoria química do solo pelo uso do gesso em relação à produtividade em situações de déficit hídrico, foram instaladas câmaras de exclusão parcial da precipitação sobre a cultura da soja nas safras de 2011/12 e 2013/14 no Experimento I (Anexo A). Tais câmaras consistiram de faixas plásticas montadas sobre uma estrutura de madeira que excluía aproximadamente 30% da precipitação pluvial ocorrida na área. Para isolamento lateral, foram colocadas faixas de plástico enterradas e ao entorno da câmara evitando a entrada da água lateralmente por escoamento horizontal. Os tratamentos selecionados no Experimento I para receber a restrição da precipitação foram de 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso. Os tratamentos com 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ foram selecionados por apresentar uma significativa melhoria química do ambiente subsuperficial do solo (Tabela 3).

4.3.5. Determinação da precipitação real, normal e ideal para as culturas de grãos

A precipitação ocorrida (real) observada durante o ciclo e para o período crítico foi registrada a partir de estações pluviométricas próximas aos experimentos investigados. A precipitação normal para o ciclo da cultura e para o período crítico, estabelecida como a média dos últimos 30 anos (entre 1961 a 1990), foi obtida a partir do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2014).

Com relação à precipitação ideal para a cultura do milho, de acordo com Radin et al. (2003) e Bergamaschi et al. (2001) na média de quatro anos durante as safras de 1993/94 a 1996/97, o consumo de água da cultura do milho foi de 5,1 mm precipitados por dia. Dessa forma o consumo em mm durante o ciclo do milho foi obtido multiplicando-se os dias do ciclo da cultura em cada Experimento pelo fator 5,1 mm (aproximadamente 765 mm para o ciclo). De acordo com Bergamaschi et al. (2007), para as principais regiões produtoras de milho do RS, foram encontradas relações assintóticas entre a precipitação e os principais estádios produtivos da cultura, sendo que a produtividade estabiliza quando a precipitação totaliza acerca de 300 mm no período de 45 dias, contado a partir de 5 dias antes do pendoamento. Com base nisto, a precipitação de 300 mm distribuídas durante o período crítico foi; considerada como ideal para a cultura do milho.

De acordo com Bergamaschi et al. (2007), as melhores produtividades da cultura da soja foram obtidos com 650 a 700 mm de água bem distribuídas no ciclo (7 a 8 mm dia⁻¹). Os mesmos autores também observaram que são necessários 300 mm no período crítico de 60 dias correspondentes da floração ao enchimento de grãos da cultura. Dessa forma foi usada uma média de 675 mm como precipitação ideal para o ciclo da cultura e de 300 mm para o período crítico.

Em relação à cultura do trigo, Westphalen (1983) constatou que a precipitação ideal durante o ciclo da cultura foi 3,9 mm dia⁻¹. No entanto essa precipitação foi mais crítica durante o período que ocorreu nos estádios de emborrachamento, espigamento e enchimento de grãos somando um período de 50 dias. Assim, o número de dias de ciclo da cultura e o número de dias do período crítico foram multiplicados pelo fator de 3,9 mm resultando na precipitação ideal para cada cultivo da cultura do trigo (aproximadamente 507 mm para o ciclo e 195 mm para o período crítico).

4.3.6. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o procedimento PROC GLM no SAS (Sistemas de Análise Estatística Institute Inc., 1985) em um modelo em blocos completos ao acaso. As análises de regressão foram realizadas utilizando o procedimento PROC REG no SAS. Quando houve efeito significativo entre as doses de gesso isoladas ou combinadas com calcário com a saturação por bases e saturação por Al para a última coleta realizada, o efeito dos foi analisado por regressão. Quando houve efeito significativo entre os tratamentos com os kg de grãos por mm precipitado, o efeito foi analisado por regressão. As médias da saturação por bases e saturação por Al em cada camada do solo nos tratamentos de 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ foram submetidas ao teste F e comparados pela diferença mínima significativa (DMS) (Teste de Tukey). Para os tratamentos com exclusão da precipitação, as médias da produtividade foram submetidas ao teste F e comparadas pelo teste de Tukey com significância em $p < 0,05$.

4.4. Resultados e Discussão

4.4.1. Caracterização dos atributos químicos do solo anteriormente à aplicação dos tratamentos nos quatro Experimentos investigados

Os Latossolos são naturalmente ácidos e inférteis (ESCOSTEGUY, 2012; DALLA NORA; AMADO, 2013). Portanto os solos selecionados para esse estudo exigem técnicas que promovam a melhoria da qualidade química da camada de enraizamento. A aplicação de fertilizantes e corretivos na superfície do solo em Latossolos manejados sob SPD, geralmente resultam na melhoria química das camadas superficiais porém tem pequeno efeito nas camadas subsuperficiais ácidas e inférteis, resultado da ação lenta e limitada dos corretivos agrícolas (AMADO et al., 2009). Com isto, forma-se um gradiente de qualidade química que pode ser visualizado nos Experimentos 1, 2 e 4 (Tabela 1). Ainda, em condições onde o calcário é aplicado em doses reduzidas espaçadas por longos períodos de tempo,

especialmente em solos com predominância de cargas variáveis, o efeito do corretivo é insuficiente mesmo para correção adequada das camadas superficiais. Esse efeito pode ser observado no solo do Experimento III (Tabela 1), havendo características de acidez ainda na superfície do solo.

Considerando os critérios para recomendação de uso do calcário da CQFS-RS/SC (2004) para a camada do solo de 0,00-0,10 m ($\text{pH} > 5,5$; saturação por bases $> 65\%$, saturação por Al $< 10\%$), os Experimentos 1, 2, 4 considerando a média dos parâmetros entre as camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10, não atenderiam nenhum dos critérios anteriormente citados (Tabela 2). Dessa forma não se esperaria melhoria da produtividade em resposta a aplicação dos tratamentos considerando os critérios da CQFS-RS/SC (2004). No entanto, o Experimento III apresentava todos os critérios abaixo do limite crítico para aplicação de calcário (Tabela 2), sugerindo que nesse Experimento haveria elevada probabilidade de resposta ao uso do corretivo.

Considerando os critérios reportados por Caires (2012), o limite crítico da saturação por bases para recomendação de calcário seria de 70% na camada de 0,00-0,20 m, como proposta para atingir a máxima produtividade acumulada ao longo de 10 anos. Considerando esse critério, todas as áreas selecionadas para o estudo necessitariam da aplicação de calcário (Tabela 2) (considerando a média ponderada da saturação por bases nas camadas de solo até 0,20 m). O uso desse critério proposto por Caires (2012) para a recomendação de calcário na superfície, resulta em uma frente de alcalinização cuja intensidade é proporcional a dose e frequência de reaplicação. A elevação do pH abaixo da zona de deposição do calcário somente ocorre após o pH da zona de dissolução atingir valores na faixa de 5,0 a 5,6 (HELYAR, 1991). Já, aplicações de calcário na superfície do solo baseadas em frações da demanda de calagem ou com intervalo de tempo muito espaçado, têm resultado em melhoria da qualidade química restrita à superfície do solo, em contraste à precária qualidade química em subsuperfície (BORTOLUZZI et al., 2014).

A correção baseada na camada de solo mais profunda do que a superficial (0-0,10 m) como a proposta por Caires (2012) resultaria na amenização da transição abrupta da qualidade química entre as camadas superficiais e as subsuperficiais, favorecendo o desenvolvimento radicular até as camadas mais profundas do perfil, e assim, resultando no uso mais eficiente da água armazenada no solo, especialmente em anos de déficit hídrico (FARINA et al., 2000; ALLEONI et al., 2005). Considerando os critérios propostos por Sousa e Lobato (2002) em relação à aplicação de gesso, os autores sugeriram que os teores críticos de Ca fossem

menores que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e saturação por Al superior a 20% na camada de 0,20-0,40 m. Nesse estudo, somente os Experimentos III e IV atenderiam o critério saturação por Al (Tabela 1). No entanto nenhum dos Experimentos estudados apresentava teores de Ca inferiores ao limite crítico por aqueles autores.

A transição abrupta da qualidade química na camada de enraizamento é um fator considerado prejudicial para a produtividade das culturas (REEVE; SUMNER, 1972). Esta situação, é agravada pela irregularidade da precipitação quando da ocorrência de déficits hídricos durante o período crítico de desenvolvimento da cultura (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

4.4.2. Variabilidade pluviométrica durante o ciclo das culturas

A irregularidade temporal na distribuição pluviométrica pode ser observada na Figura 1 para o Experimento I, isso porque, enquanto o cultivo de milho de 2009/10 apresentou precipitação de 1804 mm, a safra de milho de 2012/13 recebeu a precipitação de 680 mm durante o ciclo da cultura, sendo esta 165% inferior. Ainda, durante o período crítico da soja de 2010/11 a precipitação foi de 317 mm, já na safra de 2011/12 a precipitação foi de 177 mm o que representa redução de 79% da precipitação para o mesmo período, porém em anos diferentes. De maneira semelhante a safra de soja de 2009/10 para o Experimento II recebeu precipitação de 1239 mm durante o ciclo da oleaginosa e 442 mm durante o período crítico, já para a safra de 2011/12 a precipitação durante o ciclo foi de 546 mm e durante o período crítico foi de 137 mm, o que representa redução de 127% e 223% para o ciclo e o período crítico, respectivamente. A variação da precipitação pluvial tem sido mencionada como o principal fator causador da instabilidade da produtividade em áreas agrícolas do RS e do Brasil (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

4.4.3. Atributos químicos do solo afetados pela aplicação dos tratamentos

Foi verificada interação significativa entre as doses de gesso e o tempo para os atributos químicos do solo saturação por bases e saturação por Al nos quatro Experimentos estudados (Apêndice A). Também foi observada interação significativa entre as doses de gesso e calcário, resultando no efeito significativo sobre os cátions Ca, Mg e Al (Apêndice A). Portanto, para caracterizar os efeitos do gesso sobre a saturação por bases e a saturação por Al nos solos estudados das áreas experimentais foram selecionados os resultados correspondentes à última amostragem de solo realizada em cada Experimento (Tabela 3). Para os experimentos considerados de longa duração (Experimento I e Experimento II) foram apresentados os resultados da coleta de solos realizada aos 56 meses após a aplicação dos tratamentos. Já, para os experimentos considerados de média duração (3 e 4) estão apresentados os resultados da coleta de solo realizada aos 30 meses após a aplicação dos tratamentos (Tabela 3).

Em relação ao Experimento I, não foi verificado efeito significativo ($p > 0,05$) da aplicação de gesso na saturação por bases nas camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m após 56 da aplicação dos tratamentos. No entanto, foi verificado efeito significativo do gesso apenas na saturação por bases da camada intermediária de 0,10-0,15 m e das camadas mais profundas do perfil (0,25-0,40 m e 0,40-60 m) (Tabela 3). Esse resultado se deve à migração e acúmulo de Ca nas camadas mais profundas do perfil do solo, aumentando a saturação por bases (RAIJ, 2010). Resultados anteriormente reportados por Souza et al. (2012) corroboram com os encontrados nesse estudo, em que os autores verificaram aumentos significativos na saturação por bases pelo uso do gesso em um Latossolo, apenas na camada de 0,20-0,30 m, após 55 meses da aplicação.

No Experimento I, os coeficientes de determinação mais elevados e os maiores incrementos na saturação por bases (y , em %), de acordo com as doses de gesso (x , em Mg ha^{-1}), ocorreram nas camadas de 0,25-0,40 m ($y = 28,4 + 7,52x - 0,75x^2$) e 0,40-0,60 m ($y = 27,5 + 8,04x - 1,01x^2$), com incrementos de 66% e 56%, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha. Resultados semelhantes foram observados por Caires et al. (2006), sendo que, após 56 meses da aplicação de até $9,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, verificaram-se aumentos na saturação por bases apenas nas camadas inferiores a 0,40 m.

Para a saturação por Al (y , em %) em relação às doses de gesso (x , em Mg ha^{-1}) foi observado efeito nas mesmas profundidades reportadas para a saturação por bases (Tabela 3). Esse efeito se deve, especialmente, pelo incremento dos teores de Ca que reduzem a atividade do Al na solução (MALAVOLTA et al., 1997). O maior coeficiente de determinação e a maior redução da saturação por Al pelo efeito das doses de gesso foram constatados na camada de 0,40-0,60 m ($y = 26,05 - 2,63x + 0,12x^2$), com redução de 86% em relação ao tratamento testemunha. Resultados reportados por Pauletti et al. (2014) corroboram com os encontrados nesse estudo, sendo que os autores observaram reduções significativas na saturação por Al proporcionalmente ao aumento das doses de gesso (0,0 a $12,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) aplicadas em um Latossolo (a saturação por Al passou de 87% no tratamento testemunha para valores pouco acima de 40%).

Para o Experimento II, foi constatada relação significativa e positiva entre as doses de gesso e a saturação por bases em todas as camadas do solo, com exceção apenas da camada de 0,10-0,15 m (Tabela 3). No entanto, os maiores coeficientes de determinação também foram observados nas camadas subsuperficiais de 0,25-0,40 m ($y = 36,2 + 11,9x - 1,45x^2$) e 0,40-0,60 m ($y = 21,1 + 12,31x - 1,24x^2$), com incrementos na ordem de 68% e 147%, respectivamente, em relação à testemunha. Quanto à saturação por Al, não foi verificado efeito das doses de gesso até a camada de 0,15-0,25 m por conta da inexistência de Al trocável até essa camada. Porém, para as camadas mais profundas, foi observado efeito quadrático ($p < 0,01$) nas camadas de 0,25-0,40 m ($y = 18,89 - 7,89x + 0,89x^2$) e 0,40-0,60 m ($y = 36,8 - 9,90x + 0,94x^2$), com reduções em 245% e 236%, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha. Resultados semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2012) com aplicações de gesso em um Latossolo.

Para o Experimento III, aos 30 meses após a aplicação dos tratamentos, foi observado aumento linear, positivo e significativo na saturação por bases na maioria das camadas do solo, com exceção das camadas de 0,10-0,15 m e 0,15-0,25 m, nas quais foi verificado efeito quadrático ($p < 0,05$) (Tabela 3), em função da aplicação de gesso. Apesar de o solo dessa área, que era o mais ácido, não ter atingido os níveis críticos de saturação por bases [65% na camada 0,00-0,10 m (CQFS-RS/SC, 2004)] com nenhuma dose aplicada, de acordo com as equações ajustadas para a camada de 0,00-0,05 m ($y = 51,74 + 1,47x$) houve incremento de 14% na saturação por bases. Ainda, para as camadas subsuperficiais de 0,15-0,25m ($y = 21,4 - 1,88x + 0,92x^2$) e 0,25-0,40 m ($y = 19,1 + 1,98x$) esse incremento foi de 12% e 52%, respectivamente, em relação à testemunha. Em relação à saturação por Al, foi verificado

decréscimo para a maioria das profundidades amostradas, em função das doses de gesso, com exceção das camadas de 0,00-0,05 m e 0,40-0,60 m (Tabela 3). Para a camada de 0,10-0,15 m houve redução linear na saturação por Al ($y = 20,31 - 2,78x$), alcançando níveis inferiores a 10% [valor crítico segundo a CQFS-RS/SC (2004)] nas doses mais elevadas de gesso combinadas com calcário. Para as camadas de 0,15-0,25 m ($y = 39,69 + 5,16x - 1,72x^2$) e 0,25-0,40 m ($y = 39,75 + 4,40x - 1,46x^2$), as doses de gesso reduziram a saturação por Al em 76% e 59%, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha.

Para o Experimento IV, a aplicação das doses de gesso combinadas com $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, não afetaram a saturação por bases nas camadas superficiais do solo (Tabela 3). No entanto, a saturação por bases média na camada de 0,00-0,10 (média da saturação por bases calculada com as camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m) foi superior a 75% (Tabela 2). Contudo, foi observado efeito quadrático ($p < 0,05$) para as profundidades de 0,15-0,25 m ($y = 34,27 - 8,62x + 2,15x^2$) e 0,25-0,40 m ($y = 22,47 - 6,05x + 1,26x^2$), além do efeito linear ($p < 0,05$) para a camada de 0,40-0,60 m ($y = 8,37 - 2,17x + 0,75x^2$) (Tabela 3), representando incrementos na ordem de 75%, 40% e 167%, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha. Já, para a saturação por Al foram observadas reduções lineares apenas nas camadas de 0,25-0,40 m ($y = 54,93 - 2,40x$; $p < 0,05$) e 0,40-0,60 m ($y = 69,63 - 2,43x$; $p < 0,01$), representando decréscimos de 36% e 26%, respectivamente, para a maior dose de gesso combinada ao calcário em relação à testemunha.

Diferentemente do que foi observado no Experimento III, o solo do Experimento IV apresentou efeitos mais pronunciados nas camadas mais profundas do solo. Esse resultado se deve, especialmente, pela elevada qualidade química superficial do solo dessa área, potencializando o efeito de dissolução e descida gesso em subsuperfície (DALLA NORA et al., 2014a). Esse efeito se assemelha com a aplicação do calcário combinado ao gesso em um solo ácido, ao passo que o primeiro aumenta o pH, teores de Ca e Mg em superfície, o sulfato presente no gesso tem sua descida facilitada pelo maior saldo de cargas negativas, resultando na redistribuição do Ca e Mg nas camadas mais profundas do perfil (RAIJ, 2010).

São escassos os trabalhos que relacionam a produtividade das culturas com os valores de saturação dos cátions (Ca, Mg e K) na CTC (FAGERIA, 2001). Em estudos anteriores, Bear e Toth (1948) propuseram que a participação dos cátions no complexo de troca deveriam somar 80%, constituindo-se de 65% de Ca, 10% de Mg, e 5% de K. Para o estudo em questão, na dose de $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso, o solo do Experimento I atingiu valores próximos de 55% de Ca, 17,0% de Mg e 2,5% de K (Apêndice E), na camada de 0,00-0,10 m (média entre as

camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m). Nessa mesma dose, para o solo do Experimento II, os valores observados foram de 52%, 17% e 3,5% de Ca, Mg e K, respectivamente. No solo do Experimento III, a dose de 4,0 Mg ha⁻¹ de gesso proporcionou valores de 38%, 12% e 3%, de Ca, Mg e K, respectivamente. Já, para o solo do Experimento IV, na dose de 6,0 Mg ha⁻¹ de gesso combinada ao calcário, os percentuais alcançados de Ca, Mg e K na CTC foram 55%, 23% e 4,3%, respectivamente (Apêndice E). De maneira geral, os tratamentos não alcançaram adequado balanço catiônico no complexo de troca. Os quatro solos estudados se assemelharam pelas reduzidas saturações por Ca e K em detrimento da elevada saturação por Mg. Tal efeito deve-se a aplicação periódica de calcário dolomítico ao longo dos anos associada a monocultura de soja e às reduzidas doses de K recomendadas quando o teor no solo é médio ou elevado, situação corriqueira em Latossolos do RS. Nesse contexto, a aplicação de gesso aumenta a participação de Ca e diminui a participação de Mg no complexo de troca, assim, o manejo adequado desse insumo pode ser de grande valia para melhorar o equilíbrio catiônico de tais solos ao longo do tempo.

Tabela 3: Regressão entre saturação por bases e saturação por alumínio (Sat. por Al) com as doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário para o Experimento I e Experimento II após 56 meses da aplicação dos tratamentos e para o Experimento III e Experimento IV após 30 meses da aplicação dos tratamentos.

Dose	Prof. (m)											
	0,00-0,05		0,05-0,10		0,10-0,15		0,15-0,25		0,25-0,40		0,40-0,60	
	V%	Sat. Al	V%	Sat. Al	V%	Sat. Al	V%	Sat. Al	V%	Sat. Al	V%	Sat. Al
Experimento I												
0,0	71,1	0,0	64,7	2,5	56,2	6,4	46,9	10,3	33,3	21,1	30,6	24,4
1,0	75,8	0,0	63,7	0,0	51,6	5,5	41,0	12,5	28,8	25,6	30,1	27,6
2,0	78,1	0,0	66,3	0,2	60,2	4,1	54,1	7,3	38,4	15,8	39,2	18,5
3,0	80,5	0,0	72,0	0,0	61,2	2,1	51,3	5,8	43,4	12,6	42,2	19,3
4,0	77,3	0,0	66,9	0,0	59,5	1,6	58,9	5,6	50,8	7,6	45,9	17,8
5,0	76,3	0,0	68,4	0,0	62,9	1,8	49,7	4,4	49,4	6,3	43,7	15,8
6,5	80,0	0,0	69,6	0,0	62,4	5,1	51,2	8,9	43,1	13,6	35,9	14,2
Efeito	ns	s/Al	ns	s/Al	Q*	Q*	ns	ns	Q*	Q*	Q**	Q*
R²	-	-	-	-	0,62	0,82	-	-	0,75	0,73	0,80	0,84
Experimento II												
0,0	69,0	0,0	65,7	0,0	65,4	0,0	54,0	2,4	36,9	19,1	25,7	36,4
1,0	67,5	0,0	65,5	0,0	66,1	0,0	54,4	0,0	47,9	11,4	24,9	27,8
2,0	71,8	0,0	71,6	0,0	65,1	0,0	56,0	0,0	49,7	7,4	40,8	21,8
3,0	74,3	0,0	78,8	0,0	76,0	0,0	63,4	0,0	59,5	2,5	48,0	15,8
4,0	75,0	0,0	74,8	0,0	70,6	0,0	65,0	0,0	62,3	1,5	50,6	13,0
5,0	76,9	0,0	74,8	0,0	72,6	0,0	65,3	0,0	60,7	2,5	55,2	8,7
6,5	75,3	0,0	72,1	0,0	63,8	0,0	59,8	0,0	51,2	5,0	46,6	13,3
Efeito	Q*	s/Al	Q*	s/Al	ns	s/Al	Q*	s/Al	Q**	Q**	Q*	Q**
R²	0,85	-	0,78	-	-	-	0,77	-	0,94	0,98	0,89	0,99
Experimento III[#]												
0,0	51,3	4,9	33,9	24,0	26,9	29,5	22,1	39,6	20,6	40,1	16,8	41,0
1,0	53,9	8,3	26,7	14,4	27,5	29,0	20,0	42,1	20,7	42,0	19,4	41,2
2,0	54,3	6,3	39,3	12,4	24,2	34,4	19,9	44,7	20,3	43,8	23,6	40,9
3,0	56,7	4,3	41,6	12,5	30,1	34,0	23,9	41,6	26,4	37,8	22,6	43,2
4,0	56,8	3,7	46,5	9,0	32,9	22,2	31,4	28,4	26,9	36,2	28,1	29,8
5,0	59,4	4,6	49,8	7,8	39,6	17,9	33,5	24,2	29,4	24,5	26,8	33,1
Efeito	L**	ns	L*	L*	Q*	Q*	Q*	Q*	L**	Q*	L**	ns
R²	0,95	-	0,80	0,82	0,94	0,83	0,93	0,92	0,85	0,95	0,87	-
Experimento IV[§]												
0,0	84,1	0,0	73,4	0,0	43,7	2,9	33,0	31,4	21,8	53,5	7,5	69,7
2,0	85,7	0,0	73,3	0,5	57,3	6,7	29,4	23,2	17,5	52,8	9,8	65,2
4,0	84,7	0,0	65,7	0,0	49,0	4,1	30,3	25,4	16,4	44,3	9,0	58,7
6,0	90,6	0,0	79,4	0,0	61,9	0,0	61,1	22,6	32,4	40,3	23,5	55,7
Efeito	ns	s/Al	ns	s/Al	ns	ns	Q*	ns	Q*	L*	L*	L**
R²	-	-	-	-	-	-	0,95	-	0,94	0,92	0,89	0,98

NS: não significativo; s/Al: sem Alumínio; L: significativo para regressão linear; Q: significativo para regressão quadrática; * significativo para $p < 0,05$; ** significativo para $p < 0,01$; [#]Resultados obtidos pela média das repetições entre os tratamentos com diferentes doses de gesso que não receberam calcário com os que receberam calcário; [§]Médias das repetições para os tratamentos que receberam gesso e 3,6 Mg ha⁻¹ de calcário, tratamento que proporcionou melhores resultados no perfil do solo.

4.4.4. Regime da precipitação e seu efeito na produtividade com a melhoria química do perfil do solo

Observando a precipitação real durante o ciclo e durante o período crítico das culturas avaliadas em relação às precipitações normais e ideais (Figura 2), foi constatada elevada variação entre os cultivos. Para o Experimento I, durante a safra de milho de 2009/10 a precipitação total do ciclo e do período crítico foi de 1249 e 465 mm, respectivamente sendo superior à precipitação normal (de 706 e 218 mm respectivamente e mesmo à precipitação ideal estimada em 765 e 300 mm, respectivamente, para o mesmo período. Já para a safra de 2012/13 a precipitação total do ciclo (730 mm) foi ligeiramente inferior à precipitação ideal (765 mm), mas durante o período crítico a precipitação foi 50% inferior à ideal. De maneira semelhante para o Experimento II, no cultivo de milho da safra de 2010/11, a precipitação do ciclo da cultura (842 mm) foi pouco superior à precipitação ideal (765 mm), no entanto, durante o período crítico a precipitação foi 38% inferior à precipitação ideal para o mesmo período. A redução da precipitação poder resultar em decréscimos de até 51% da produtividade quando ocorrer durante o período crítico da cultura Matzenauer (1986).

Em relação a cultura do trigo, durante as safras de 2012 (Experimento IV) e de 2013 (Experimentos I, II e III), a precipitação ocorrida durante o ciclo da cultura e durante o período crítico foi superior à precipitação ideal e próxima da precipitação normal (Figuras 2a, 2b, 2c e 2d). No entanto, para a safra de 2012 (Experimento III), apesar da precipitação durante o ciclo ter sido 72% superior à ideal, a precipitação durante o período crítico foi 19% inferior à ideal e 54% inferior à normal (Figura 2c). No entanto, devido a menor evapotranspiração associada a precipitação adequada, frequentemente não é verificado redução na produtividade do trigo por conta de déficit pluviométrico no RS (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Para a cultura da soja no Experimento I, apenas a safra de 2013/14 apresentou precipitação superior à ideal durante o ciclo e o período crítico (Figura 2a). Nas safras de 2010/11 e 2011/12 a precipitação durante o ciclo foi 30% superior e 41% inferior à ideal, respectivamente. Porém, durante o período crítico da cultura, ambos os anos apresentaram redução de 20% e 26% da precipitação, respectivamente. Para o Experimento II, apenas a safra de 2009/10 apresentou precipitação total acima da precipitação ideal durante o ciclo e o período crítico da cultura (Figura 2b). Nas safras de 2011/12 e 2012/13 a precipitação durante

o ciclo foi 68% inferior e 1% superior à ideal, respectivamente. Já para o período crítico, ambas as safras apresentaram redução de 26% e 50% em relação à precipitação ideal, respectivamente.

Em relação ao Experimento III, a precipitação ocorrida durante o ciclo da soja na safra de 2012/13 foi superior à ideal, na safra de 2013/14, a precipitação real foi ligeiramente inferior à precipitação ideal (Figura 2c). No entanto, a precipitação ocorrida durante o período crítico foi 29% e 33% inferior à precipitação a ideal para o mesmo período durante as safras de 2012/13 e 2013/14, respectivamente (Figura 2c). De maneira semelhante, a precipitação ocorrida durante o ciclo da safra de soja de 2012/13 para o Experimento IV foi superior à precipitação ideal, mas para o período crítico a precipitação foi 29% inferior à ideal. A oscilação pluviométrica afeta profundamente a produção das culturas como constatado por Bergamaschi et al. (1989) e Berlato (1992), onde os autores observaram para o Estado do RS, que em anos com severo déficit hídrico (1978/79, 1985/86, 1987/88 e 1990/91), as produtividades médias de soja estiveram abaixo de 1000 kg ha^{-1} , enquanto que por exemplo no ano seguinte a última safra (1991/92), com maior quantidade e melhor distribuição da precipitação, a produtividade média atingiu 2700 kg ha^{-1} .

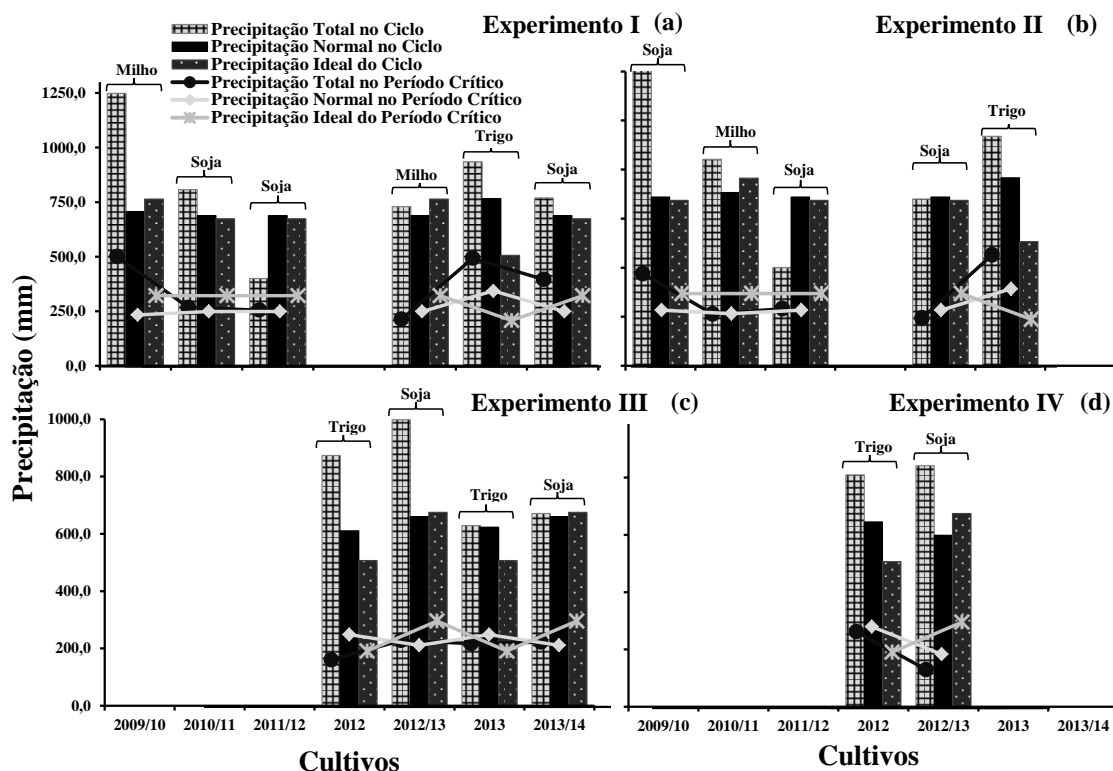


Figura 2: Precipitação pluvial total, normal e ideal durante o ciclo e o período crítico das culturas nos Experimentos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Fonte: INMET.

Como não foi verificada restrição hídrica durante o ciclo do milho durante as três safras avaliadas (Figura 2a, 2b), observando os resultados obtidos entre kg de grãos de milho por mm precipitado durante o ciclo da cultura em relação às doses de gesso aplicadas, nota-se que durante a safra de 2009/10 (Experimento I), quando ocorreu elevada precipitação durante todo o ciclo (Figura 1), o incremento na produtividade, de acordo com a equação ajustada, foi de 5,5% para a dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso em relação à testemunha (Figura 3a). Na safra de 2012/13 (Experimento I), de acordo com a equação ajustada, a maior dose de 6,5 Mg ha⁻¹ atingiu a produtividade de 15,5 kg de grãos por mm, sendo esta 8,5% superior à testemunha. Já, para o cultivo de 2010/11 (Experimento II) a máxima produção de grãos de 11,4 kg por mm precipitado foi 15% superior à testemunha.

Em relação à quantidade de grãos de milho produzido (kg) por mm precipitado durante o período crítico, a safra de 2009/10, na dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso, apresentou incremento de apenas 5,5% na máxima produtividade com produção de 17,6 kg de grãos por mm (Figura 3b), reiterando que nessa safra não houve restrição hídrica no período crítico (Figura 2a). No entanto, as produtividades máximas alcançadas nas safras de 2012/13 (Experimento I) (32,8 kg de grãos por mm) e 2010/11 (Experimento II) (31,2 kg de grãos por mm) foram semelhantes entre si e mais elevadas que na safra de 2009/10. Essa semelhança entre as safras de 2010/11 e 2012/13 em relação a produção de grãos por mm precipitado no período crítico, deve-se ao fato de ambas as áreas terem apresentado estresse hídrico nesse período, sendo que em ambos os Experimentos houve redução média de 44% da precipitação real em relação à precipitação ideal (Figura 2a, 2b). Caires et al. (2008a; 2008b) constatou que a redução da acidez do solo causada pela calagem superficial aumentou o crescimento radicular e melhorou a nutrição das culturas do milho e da soja, sendo tais efeitos mais evidentes quando o teor de água disponível no solo foi reduzido.

O déficit hídrico incrementa a susceptibilidade do milho à acidez (FREIRE, 1984), portanto a restrição hídrica, especialmente durante o período crítico (Figura 3b), afeta o desenvolvimento radicular e o uso da água especialmente em condições de baixa qualidade química subsuperficial (REEVE; SUMNER, 1972; RITCHEY, 1980; SHAINBERG et al., 1989; FARINA et al., 2000). Em um estudo realizado por Joris et al. (2013) com aplicação superficial de calcário em SPD, os autores observaram maior sensibilidade de genótipos de milho ao Al quando houve estresse hídrico. Ainda, em decorrência da acidez do solo foi verificada redução na absorção de N, por consequência do menor desenvolvimento radicular.

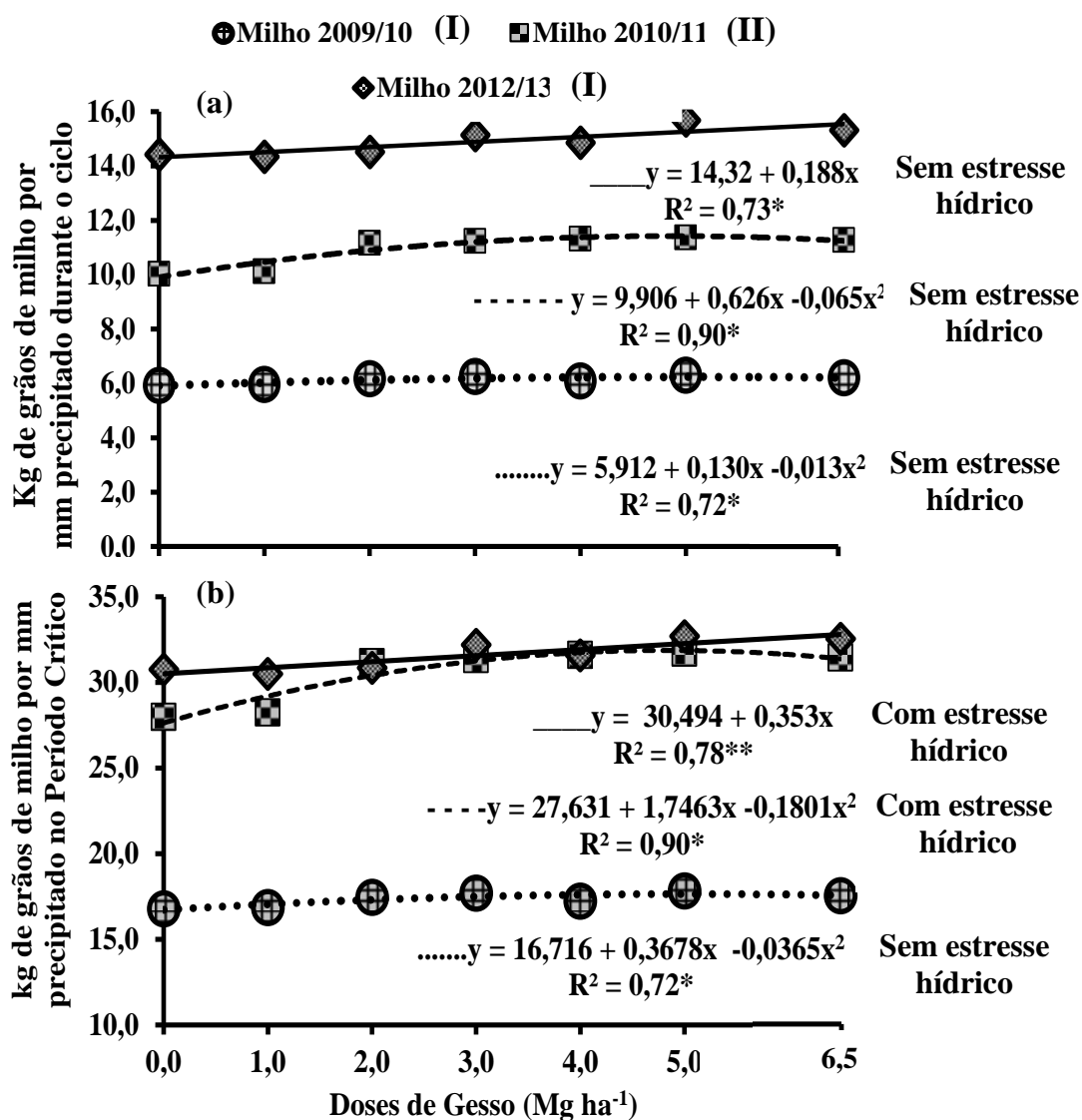


Figura 3: Relação entre a quantidade de grãos de milho produzida (kg) por mm precipitado durante o ciclo (a) e por mm precipitado durante o período crítico (b) com as doses de gesso aplicadas nos Experimentos I e II. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.

Para a cultura do trigo, em relação aos resultados que associam a quantidade de grãos produzida (kg) por mm precipitado durante o ciclo da cultura em relação aos tratamentos, nota-se que a safra de 2013 para o Experimento I apresentou o mais elevado índice de eficiência, atingido a produção máxima de 3,64 kg por mm para a dose de 5,8 Mg ha⁻¹ de gesso, seguido pela safra de 2013 do Experimento III que atingiu a máxima produção de 3,48 kg por mm para a dose de 4,2 Mg ha⁻¹ de gesso (Figura 4a).

Quando se analisou quantidade de grãos produzida por mm precipitado durante o período crítico, notou-se que a safra com a maior produção foi a de trigo de 2012 para o Experimento III, safra a qual foi a única a apresentar estresse hídrico durante o período crítico (Figura 2c). Com isso, a produção máxima alcançada foi de 15,7 kg por mm precipitado na dose de 3,5 Mg ha⁻¹ de gesso, representando incremento de 14% em relação à testemunha, sendo esse o maior incremento de produção entre as safras de trigo avaliadas, indicando que o efeito da melhoria da qualidade química do solo é preponderante para estabilizar a produtividade das culturas em situações de déficits hídricos durante os períodos críticos (Figura 4b).

Na safra de 2013, ainda para o Experimento III, foi constatada a segunda maior produção de grãos por mm precipitado (9,9 kg por mm precipitado), 16% superior à testemunha de acordo com a equação ajustada (Figura 4b). Destaca-se que o Experimento III apresentava a pior qualidade química entre os solos estudados (Tabela 2), sugerindo que a melhoria química da camada de enraizamento afetou positivamente o desenvolvimento da cultura do trigo (Figura 4b). Na sequência, o cultivo de 2012 (Experimento IV) apresentou produção máxima de 8,89 kg por mm precipitado, sendo essa 8% superior a testemunha. Posteriormente, o cultivo de 2013 (Experimento I) apresentou produção máxima de 7,43 kg por mm precipitado, representando incremento de 9% em relação à testemunha. Para a safra de 2013 (Experimento II) não foi verificada relação significativa entre a quantidade de grãos produzida por mm precipitado e as doses de gesso (Figura 4b). Esse resultado deve-se à precipitação muito superior à precipitação ideal durante o ciclo e durante o período crítico da cultura (Figura 2b), associado ao fato de o solo do Experimento II apresentar a melhor qualidade química subsuperficial entre os solos estudados (Tabela 2).

Em estudo realizado por Caires et al. (2008a), avaliando o efeito do calcário na melhoria química do perfil do solo, os autores verificaram que a produtividade e o desenvolvimento radicular da soja e do milho não foram afetados, enquanto o desenvolvimento radicular do trigo foi afetado até a camada de 0,00-0,20 m e a produtividade foi aumentada em 210%. De acordo com os autores, esse efeito foi atribuído à limitação hídrica durante o ciclo de desenvolvimento da cultura enquanto a soja e o milho não apresentaram restrição hídrica. Rampim et al. (2011) constataram que a cultura do trigo respondeu à melhoria química do solo pela aplicação de gesso quando houve restrição hídrica. Os autores também justificaram a maior resposta do trigo ao gesso devido à elevada acidez do solo em questão, já que cultivares de trigo tendem a ser mais sensíveis à acidez (MUZILLI et

al., 1978). Caires et al. (2002) observaram maiores respostas da cultura do trigo quando as doses de gesso foram aplicadas em um Latossolo com elevados índices de acidez.

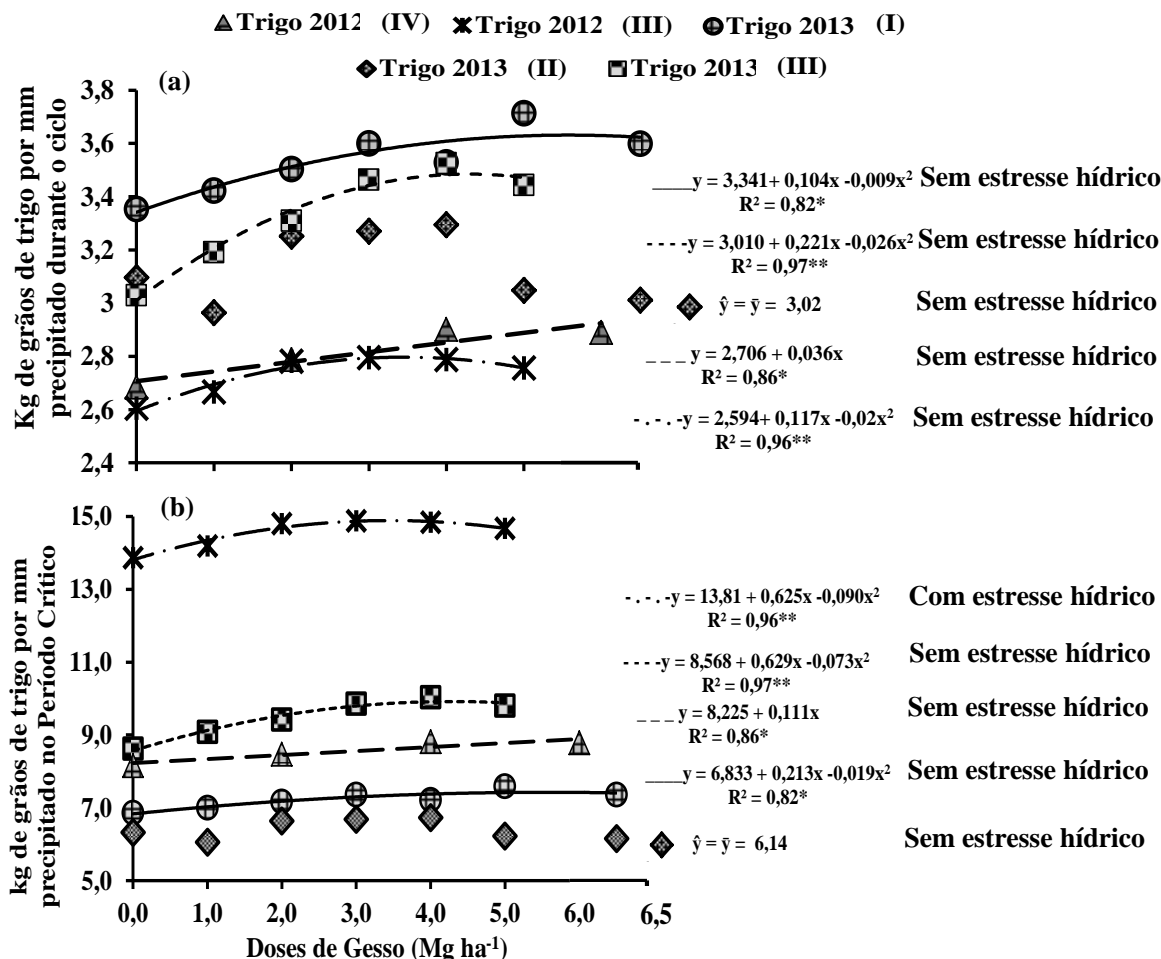


Figura 4: Relação entre a quantidade de grãos de trigo produzida (kg) por mm precipitado durante o ciclo (a) e durante o período crítico (b) com as doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário nos Experimentos I, II, III e IV. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.

Em relação à cultura da soja, não foi verificada relação significativa entre kg de grãos por mm precipitado com as doses de gesso para as safras de 2009/10 (Experimento II) (Figura 5b) e 2013/14 (Experimento I) (Figura 5a), cultivos esses em que a precipitação durante o ciclo (Figura 2a) e durante o período crítico (Figura 2b) foram superiores a precipitação ideal para a cultura. Dentre os nove cultivos de soja, sete deles não apresentaram restrição hídrica durante o ciclo (Figura 5a), e apenas dois cultivos apresentaram restrição hídrica durante o ciclo (Figura 5b).

No que diz respeito a quantidade de grãos produzidos (kg) por mm precipitado durante o período crítico em função das doses de gesso, nota-se uma inversão dos resultados obtidos na precipitação durante o ciclo. Isso aconteceu porque apenas dois cultivos não apresentaram restrição hídrica no período crítico, sendo essas as safras de soja de 2009/10 (Experimento II) e de 2013/14 (Experimento I) (Figura 5c), quando não foi verificada relação significativa com as doses de gesso. Contudo, sete das nove safras apresentaram restrição hídrica durante o período crítico da cultura (Figura 5d).

Para as safras em que foi verificada restrição hídrica durante o período crítico, houve incremento de 16% em 2011/12 no Experimento I (Figura 5d) e de 9% em 2011/12 no Experimento II. Para a safra de 2012/13 (Experimento III) o acréscimo de produção foi de 14%. Para a safra de 2010/11 (Experimento I) o incremento foi de 6,5%, e na safra de 2013/14 (Experimento III), o incremento para a dose de maior produtividade em relação à testemunha foi de 12%. Ainda foi observado incremento de 7% na safra de 2012/13 (Experimento II) em relação a testemunha e, por fim, a safra de 2012/13 (Experimento IV) apresentou acréscimo de produtividade de 3% em relação ao tratamento testemunha.

Os elevados incrementos de produtividade em ambas as safras de soja avaliadas no Experimento III (14% e 12%), se devem à reduzida precipitação durante o período crítico (Figura 2c) associada à reduzida qualidade química do solo na camada de enraizamento da testemunha (Tabela 2). Durante a safra de 2012/13 (Experimento II) a precipitação real durante o período crítico da cultura foi 50% inferior à precipitação ideal no mesmo período (Figura 2b), no entanto foi constatado pequeno incremento na produtividade (Figura 5d). Esse resultado deve-se, provavelmente, à elevada qualidade química do perfil do solo em questão (Tabela 2), pois mesmo nos tratamentos que não receberam doses de gesso foram verificadas condições adequadas para o desenvolvimento radicular, e assim favorecendo o uso da água em camadas mais profundas do perfil (SHAINBERG et al., 1989). Resultados semelhantes foram reportados por Joris et al. (2013), em que os autores observaram que a complexação do Al pela matéria orgânica reduziu a toxicidade do Al sobre as culturas quando não foi constatado estresse hídrico. No entanto, quando o estresse hídrico foi imposto, a toxicidade por Al comprometeu severamente o crescimento radicular e a nutrição das plantas de soja.

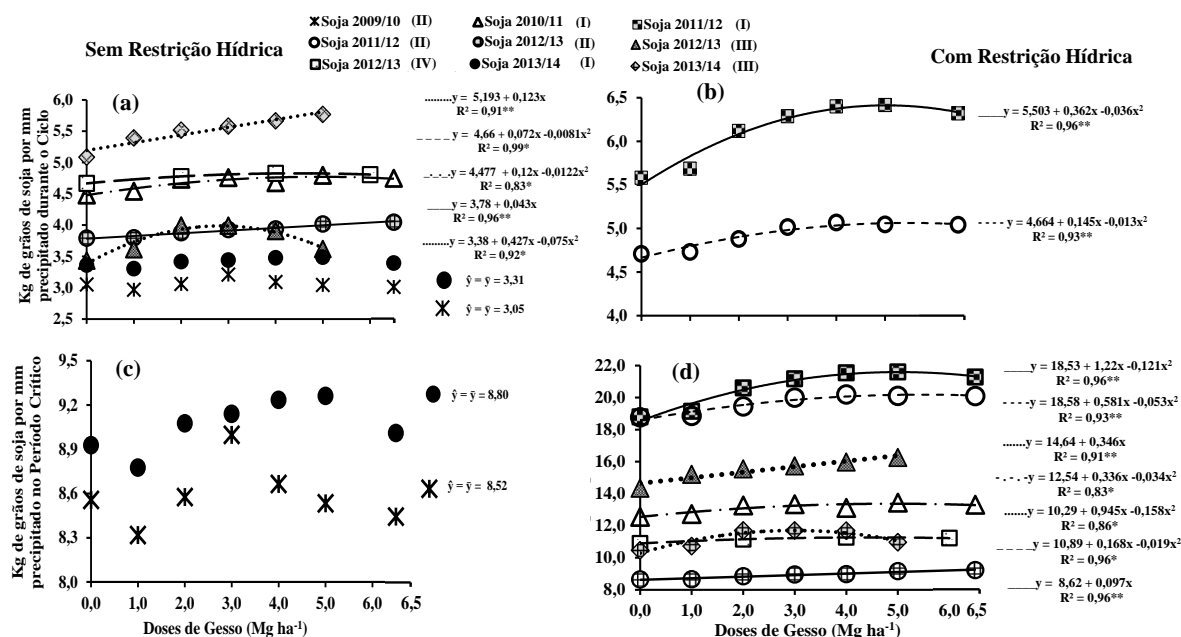


Figura 5: Relação entre a quantidade grãos de soja produzida (kg) por mm precipitado durante o ciclo (a); e por mm precipitado durante o ciclo (b); relação entre kg de grãos de soja por mm precipitado durante o período crítico (c) por mm precipitado durante o período crítico (d) com as doses de gesso isoladas ou combinadas ao calcário nos Experimentos I, II, III e IV. * Significativo a 5% de probabilidade de erro; ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.

4.4.5. Efeito da melhoria química do solo em mitigar o déficit hídrico induzido

De acordo com os resultados observados na Figura 6a, referente à primeira safra de soja que recebeu as câmaras de exclusão da precipitação, nota-se que a saturação por bases para a dose de 5,0 Mg ha⁻¹ foi mantida acima de 70% até a camada de 0,10-0,15 m. De acordo com a Caires (2012) a saturação por bases estimada para 70% na camada de 0,00-0,20 m, proporciona máximo retorno econômico no período de 10 anos. Para as camadas subsuperficiais de 0,15-0,25 m; 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m, a saturação por bases aumentou 20%, 59% e 67%, respectivamente, para a dose de 5,0 Mg ha⁻¹ em relação à testemunha. Já a saturação por Al (Figura 6a), para a dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso, permaneceu abaixo de 5% até a camada de 0,25-0,40 m, com redução de 16% na testemunha para 3% na dose mencionada. Para a camada de 0,40-0,60 m essa redução foi de 21% para 7% nos tratamentos testemunha e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso, respectivamente.

Depois de 56 meses após a aplicação dos tratamentos nota-se que houve redução do efeito das doses de gesso, sendo que a saturação por bases para a dose de 5,0 Mg ha⁻¹

permaneceu acima de 70% apenas até a camada de 0,05-0,10 m (Figura 6b): para as camadas de 0,15-0,25 m; 0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m o aumento na saturação por bases foi na ordem 29%, 52% e 50% em relação ao tratamento testemunha. Já, a saturação por Al, para a dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso, permaneceu abaixo de 5,0% até a camada de 0,15-0,25 m, enquanto a redução desse índice entre a testemunha e a dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso foi, respectivamente, de 15,2% para 6,8% na camada de 0,25-0,40 m e de 20,7% para 8,9% para a camada de 0,40-0,60 m. O aumento na saturação por bases e a redução na saturação por Al é decorrente da movimentação dos cátions Ca e Mg (RAIJ, 2010). Resultados observados por Souza et al. (2012) corroboram aos encontrados nesse estudo, em que os autores verificaram aumentos significativos na saturação por bases pelo uso do gesso apenas na camada de 0,20-0,30 m após 56 meses da aplicação dos tratamentos, não observando efeito significativo nas camadas superficiais.

Esse efeito mais pronunciado do gesso sobre os atributos químicos do solo foram verificados anteriormente por diversos estudos realizados em Latossolos (CAIRES et al., 2003; RAIJ, 2010; SOUZA et al., 2012; DALLA NORA et al., 2014b; PAULETTI et al., 2014). Em estudo realizado por DALLA NORA et al. (2014b), os autores verificam aumentos significativos na saturação por bases e reduções na saturação por Al já aos seis meses após a aplicação de gesso.

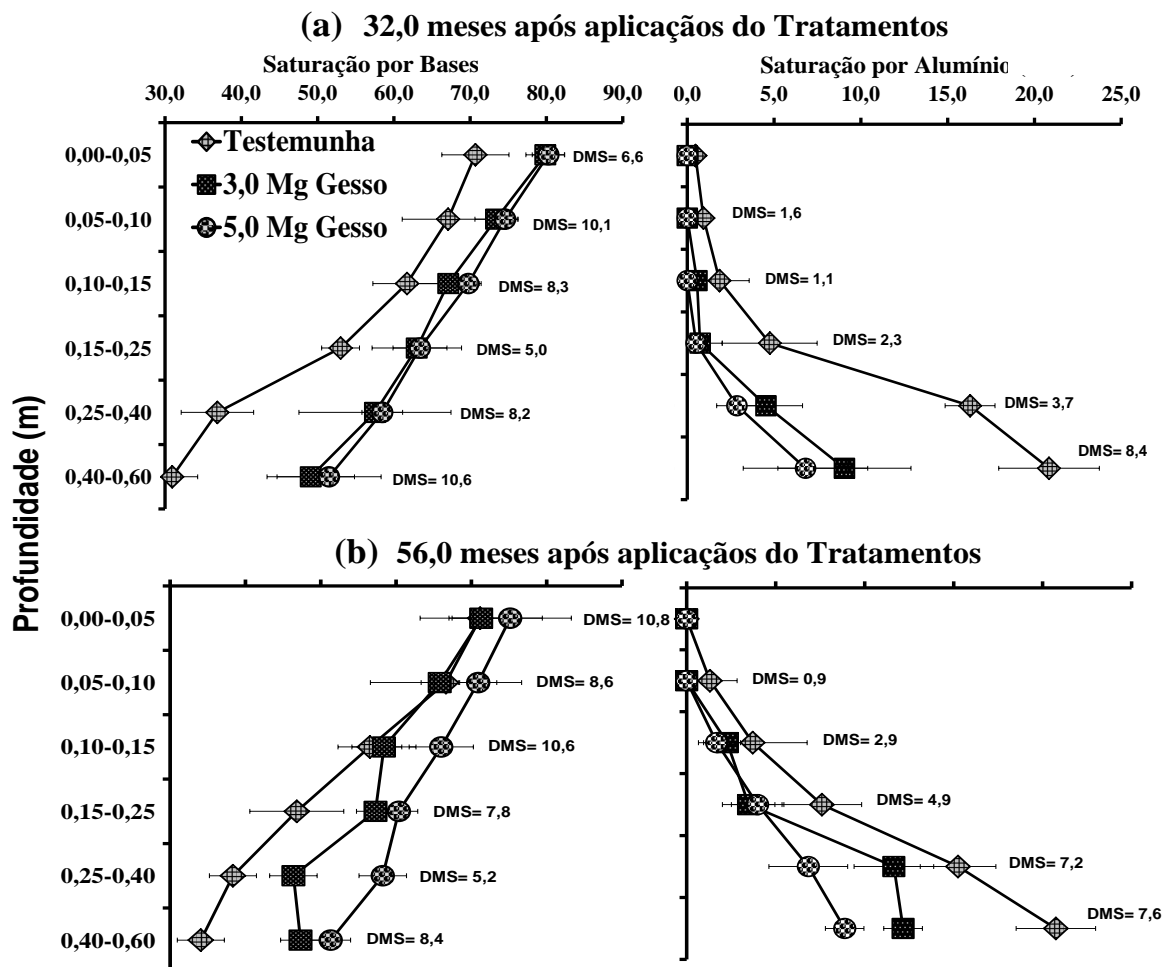


Figura 6: Saturação por bases e saturação por alumínio aos 32 meses (a) e aos 56 meses (b) após a implantação dos tratamentos no Experimento I. As épocas de coleta são referentes ao período da instalação das câmaras de exclusão da precipitação. Diferença mínima estatística (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Quando a precipitação real durante o ciclo da cultura da soja na safra de 2011/12 (30 meses após a aplicação dos tratamentos) foi restringida em 30% (redução de 120 mm durante o ciclo da cultura) na parcela testemunha, foi constatada diferença significativa entre os tratamentos testemunha sem e com restrição de precipitação, sendo essa diferença de 354 kg ha⁻¹ ou 12% da produtividade (Figura 7a). No entanto, para as doses de 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso não foi constatada diferença significativa entre os tratamentos sem e com restrição da precipitação, sugerindo que o efeito do gesso foi eficiente em atenuar a restrição hídrica.

Em relação à safra de 2013/14 (54 meses após a aplicação dos tratamentos) (Figura 7b), com a restrição de 30% da precipitação (redução de 231 mm durante o ciclo da cultura), foi verificada que a produtividade no tratamento testemunha sem exclusão da precipitação foi

significativamente superior ao tratamento testemunha que recebeu a restrição da precipitação, sendo essa diferença na ordem de 555 kg ha⁻¹ ou 19%. Da mesma maneira foi verificada diferença significativa entre os tratamentos com 3,0 Mg ha⁻¹ de gesso nas parcelas sem e com exclusão da precipitação resultando em redução de 409 kg ha⁻¹ ou 13%. Esse resultado se deve ao efeito pouco pronunciado do gesso na dose de 3,0 Mg ha⁻¹ sobre os atributos químicos do solo após 56 meses da aplicação dos tratamentos (Figura 6b). No entanto, para a dose de 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso transcorridos 56 meses, não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos sem e com restrição da precipitação, sugerindo que essa dose de gesso, além de manter elevada a qualidade química do solo, também manteve estável a produtividade da cultura da soja, mitigando o efeito deletério da restrição hídrica. Em circunstâncias em que a planta é exposta a situações desfavoráveis de precipitação pluvial, a ação fitotóxica do Al⁺³ decorrente da acidez das camadas subsuperficiais do solo no SPD é intensificada (CAIRES, 2012). Dessa forma a melhoria química do subsolo é fundamental para proporcionar um ambiente adequado para desenvolvimento radicular e melhor aproveitamento de água e nutrientes (RITCHEY et al., 1980).

Dentre os fatores determinantes para obtenção de elevadas produtividades em solos ácidos sob sistema plantio direto, destacam-se: (i) a menor fitotoxicidade de Al para as plantas (BROWN et al., 2008; ALLEONI et al., 2010); (ii) concentrações suficientes de cátions trocáveis (CAIRES et al., 2006); (iii) e umidade disponível mais elevada no solo (SALTON; MIELNICZUK, 1995; MOUSSA-MACHRAOUI et al., 2010). Em um estudo realizado por Joris et al. (2013), após 52 da aplicação de doses de calcário em um Latossolo, os autores observaram que as produtividades de soja e milho foram afetadas positivamente pela melhoria química do perfil do solo. Ainda para esse estudo, os autores verificaram que o desenvolvimento radicular foi afetado negativamente quando houve restrição hídrica para os tratamentos que não apresentaram melhoria química do solo.

Os resultados apresentados sugerem que a melhoria química do perfil do solo proporcionada pela gessagem foi capaz de atenuar parcialmente a perda de produtividade da soja associada à restrição hídrica. Como anteriormente sustentado por Ritchey et al. (1980), a formação da camada de enraizamento quimicamente corrigida possibilita que o sistema radicular explore maior área e conseqüentemente utilize o conteúdo de água armazenada no solo de maneira mais eficiente. Este fato pode representar uma importante estratégia para aprimorar o sistema plantio direto no RS e Sul do Brasil.

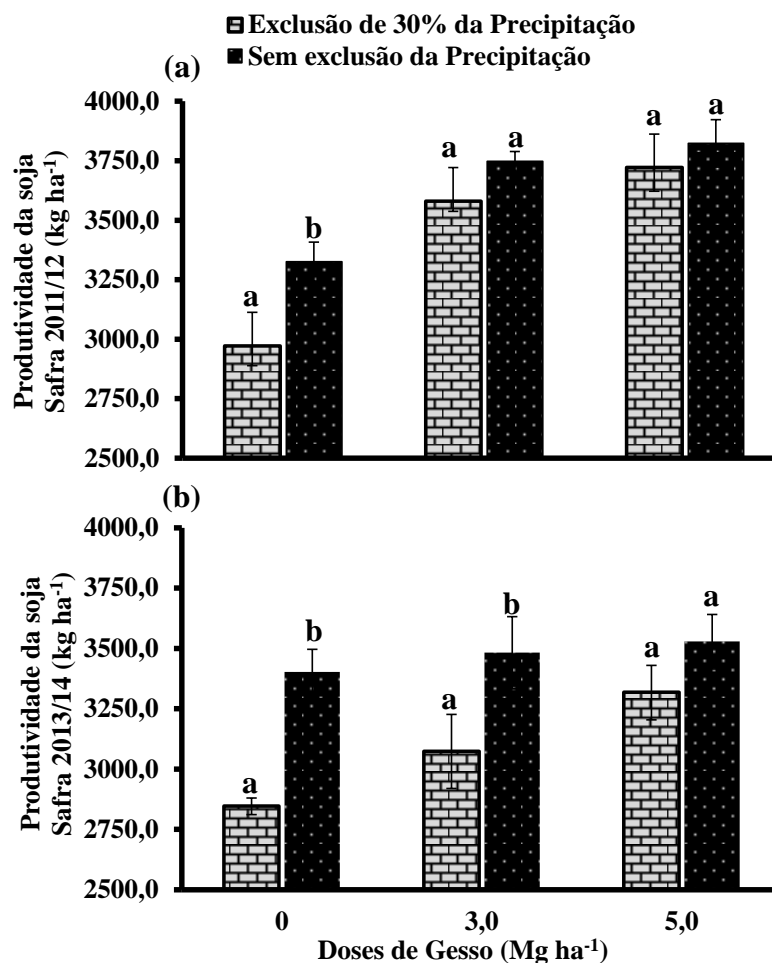


Figura 7: Produtividade da soja na safra de 2011/12 com exclusão de 30% ou 120 mm da precipitação e sem exclusão da precipitação 32 meses após a aplicação das doses de 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso (a); produtividade da soja com exclusão de 30% ou 231 mm da precipitação e sem exclusão da precipitação 54 meses após a aplicação das doses de 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso (b).

4.5. Conclusões

Após 30 meses de aplicação dos tratamentos com doses de gesso aplicadas isoladamente ou combinadas com calcário, a saturação por bases e a saturação por Al foram afetados em todo o perfil do solo pelo aumento dos teores de Ca e redução da atividade do Al. Já, após 56 meses, sobretudo as camadas subsuperficiais (0,25-0,40 m e 0,40-0,60 m) foram afetadas.

O incremento na quantidade de grãos produzida por mm de chuva, decorrente da aplicação de gesso, foi maior quando houve déficit hídrico durante o período crítico das culturas, especialmente nas áreas com maior nível de acidez em subsuperfície. O incremento na produtividade foi mais pronunciado para as culturas do milho e trigo e, em menor escala, para a soja

A melhoria química da camada de enraizamento do solo proporcionada pela adição de gesso em sistema plantio direto atenuou a perda de produtividade da soja associada à restrição hídrica.

4.6. Referências bibliográficas

ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madson, v. 74, p. 1010–1017, 2010.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Chemical attributes of a cerrado Oxisol under no-tillage as affected by lime application methods and doses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 923-934, 2005.

AMADO, T. J. C. et al. Chemical and physical attributes of Oxisols and their relation with irrigated corn and common bean yields. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 831-843, 2009.

BEAR, F. E.; TOTH, S. J. Influence of calcium on availability of other cations. **Soil Science**, Madson, v. 65, p. 69-96, 1948.

BEATON, J. D.; BURNS, G. R.; PLATOU, J. **Determination of sulphur in soils and plant material**. Tech. Bull. . 1968. p. 14. Sulphur Inst., Washington, DC.

BERGAMASCHI, H. et al. Avaliação técnica e econômica da irrigação em milho na Depressão Central do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 49.; Reunião Técnica Anual do Sorgo, 32., 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre : FEPAGRO-SCT; EMATER-RS, 2004. p. 1-4.

BERGAMASCHI, H. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro. IV. Alterações micrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 7, p. 769-777, 1989.

BERGAMASCHI, H. et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, Córdoba, v. 1, n. 1, p. 23-27, 2001.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p. il.

BERGAMASCHI, H. et al. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 603-613, 2007.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. p.11-24.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 72, p. 693-701, 2008.

BLUM, B. S. et al. Assessing available soil sulphur from Phosphogypsum applications in a no-till Cropping system. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 50, n. 4, p. 515-532, 2014.

BOLLINGER, A. et al. Taking stock of the Brazilian zero-till revolution: A review of landmark research and farmers practice. **Advances in Agronomy**, v. 91, p. 47-64, 2007.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 262-271, 2014.

BROWN, T. T. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping system. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 72, p. 634-640, 2008.

CAIRES, E. F. Calagem e uso de gesso em Sistema Plantio. **Revista Plantio Direto**, Não-Me-Toque, v. 128, p. 1-11, 2012.

CAIRES, E. F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto**. International Plant Nutrition Institute (IPNI). 2013. 14p. (Informações Agronômicas, 141)

CAIRES E. F. et al. 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**, Viçosa, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAIRES E. F. et al. 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, 2008a.

CAIRES, E. F. et al. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 357-364, 2002.

CAIRES, E. F. et al. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, Madison, v. 24, p. 302-309, 2008b.

CAIRES, E. F. et al. Soybean yield and quality as function of lime and gypsum applications. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 370-379, 2006.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, p. 209-216, 2011.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madson, v. 97, p. 791-798, 2005.

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**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 777-788, 2005.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. **Agronomy Journal**, Madson, v. 105, p. 1393-1403, 2013.

DALLA NORA, D. et al. Formação de um perfil de enraizamento profundo e a estabilidade da produtividade de culturas de grãos sob sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Não-Me-Toque, v. 1, p. 19-29, 2014a.

DALLA NORA, et al. Subsoil chemical amelioration and crop yields under continuous long-term no-till in a subtropical Oxisol. **African Journal of Agricultural Research**, Gauteng, v. 9, n. 45, p. 3338-3349, 2014b.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T. **Global overview of conservation agriculture adoption**. In: Joshi PK (ed), pp. 429-438. Lead Papers, New Delhi, India, 2009.

ESCOSTEGUY, P. A. V. Deficiência de potássio em lavouras de soja. **Revista Plantio Direto**, Não-Me-Toque, v. 127, p. 36-46, 2012.

EMATER. **Avançam perdas de Safra de grãos com estiagem no RS**. 2012. Disponível em: <<http://www.emater.tche.br/site/noticias/noticia.php?id=13997>>. Acesso em: 05 de maio de 2014.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 2nd ed. Embrapa - CNPS, Rio de Janeiro, 2006.

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, 2001.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Long-term growth effects. **Soil Science Society of American Journal**, Madson, v. 64, p. 646-651, 2000.

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

FREIRE, J. C. Resposta do milho a níveis de água e formas de aplicação de calcário em dois solos originalmente sob cerrado em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, n. 1-2, p. 305-308, 1984.

HELYAR, K. R. The management of acid soils. In: WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; MURRMAN, R. P. (Ed.) **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. p. 365-382.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2014. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 05 de junho de 2014.

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant Soil**, Madson, v. 365, p.409-424, 2013.

KAMINSKI, J. et al. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 573-580, 2005.

KÖPPEN, W. P. **Das geographic system der climate**. In: W. Köppen and R. Geiger, editors, *Handbuch der Klimatologie*. C.G. Borntrager, Berlin. 1938. p. 1-44.

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

MARENGO, J.; CAMARGO, C. G. C. Trends in Extreme air temperatures in Southern Brazil. **International Journal Climatology**, v. 11, p. 1858-1863. 2007.

MATZENAUER, R.; WESTPHALEN, S. L.; MALUF, J. R. T. **Efeito de períodos de irrigação sobre o rendimento e desenvolvimento do milho, em diferentes épocas de semeadura – 1985/86**. In: Reunião Técnica Anual do Milho, 31., 1986, Porto Alegre. Ata. Porto Alegre: IPAGRO; EMATER/RS, 1986, p. 37-41.

MUZILLI, O. et al. Tolerância de cultivares de soja e de trigo a acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 2, p.34-40, 1978.

MOUSSA-MACHRAOUI, S. B.; ERROUISSI, F.; NOUIRA, S. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 106, p. 247-253, 2010.

NAVA, G. et al. Soil Composition and nutritional status of apple as affected by long-term application of gypsum. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 215-222, 2012.

PAULETTI, V. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 495-505, 2014.

RADIN, B. et al. Evapotranspiração da cultura do milho em função da demanda evaporativa atmosférica e do crescimento de plantas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 9, n. 1-2, p. 7-16, 2003.

RAIJ, B. VAN. Gesso na agricultura. São Paulo: IPNI – **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. 2010. (Informações Agronômicas 122).

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1687-1698, 2011.

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

RITCHEY, K.D. et al. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, Madson, v. 72, p. 40-44, 1980.

SÁ, J. C. M. et al. Gestão da matéria orgânica e da fertilidade do solo visando sistemas sustentáveis de produção In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R., eds. **Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2010, p. 383-420.

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.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 313-319, 1995.

SAS - SAS INSTITUTE. **SAS/SAT: User's Guide**: version 9.2. Cary, 2009. 1848p.

SHAINBERG, I. et al. Use of gypsum on soils. **Advances in Soil Science**, Madson, v. 9, p. 1-111, 1989.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. Natural Resources Conservation Service. 11ed, Washington. 2010. 338p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Embrapa Cerrados. 2002. Planaltina, DF, Brazil.

SOUZA, F. G. et al. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1717-1732, 2012.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico n. 5).

WESTPHALEN, S. L. Evapotranspiração máxima de uma cultivar precoce de trigo em evapotranspirômetro tipo Thornthwaite e relações com tanque classe A e radiação solar. In.: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 3., 1983, Campinas. **Resumos...** Campinas: Fundação Cargill, 1983. p. 49-50.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por alternativas que atenuem a transição abrupta da qualidade química entre as camadas do solo manejado sob SPD no Rio Grande do Sul, associada às recorrentes estiagens que atingem o Estado é um desafio para técnicos, produtores e pesquisadores. A proposta construída nesse estudo atingiu seus objetivos no que diz respeito à melhoria da qualidade do perfil do solo, sem mobilização do solo, afetando positivamente a produtividade das culturas, e se destacando como uma importante ferramenta para a manutenção da estabilidade da produção agrícola.

O uso de gesso, de forma isolada ou em combinação com o calcário foi efetivo no processo de mitigação do déficit hídrico para as principais culturas de grãos do Estado do RS. Foram obtidas correlações entre a produtividade das culturas com os atributos do solo em camadas que até então não estão sendo consideradas como diagnóstico para realização de alguma intervenção de manejo. A combinação de gesso com calcário revelou interação entre os insumos com efeito potencializador entre eles. Tal efeito é relevante uma vez que a utilização destes insumos não tem recomendação pela CQFS- RS/SC (2004) .

Os resultados obtidos nesse estudo apontam para uma necessidade de reavaliação das doses, critérios e camadas diagnóstico para aplicação de calcário e gesso no RS. Sugere-se, para os próximos estudos, uma avaliação mais detalhada sobre os critérios a serem considerados para aplicação de gesso, bem como a definição de doses adequadas para as condições do RS. Também é necessária uma avaliação sobre a camada diagnóstico e os valores críticos de saturação por bases e de saturação por Al que melhor se correlacionem com a produtividade das culturas. Além disso, deve-se procurar explicar em um estudo futuro, os mecanismos que afetam a descida dos cátions no perfil do solo, ou seja, uma relação entre a saturação do nutriente em uma dada camada que afete seu aumento na camada posterior.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T. J. C. et al. Chemical and physical attributes of Oxisols and their relation with irrigated corn and common bean yields. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 831-843, 2009.

ANJOS, L. H. C. In: KER, J. C. et al. (ed.) **Pedologia: Fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2012. 343p.

BAYER, C. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, p. 55-118, 2011.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p. il.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. p.11-24.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 262-271, 2014.

CAIRES, E. F. Calagem e uso de gesso em Sistema Plantio. **Revista Plantio Direto**, Não-Me-Toque, v. 128, p. 1-11, 2012.

CAIRES, E. F. et al. Changes in soil chemical properties and corn response to lime and gypsum applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 125-136, 2004.

CAIRES, E. F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto**. International Plant Nutrition Institute (IPNI). 2013. 14p. (Informações Agronômicas, 141)

CAIRES, E. F. et al. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 357-364, 2002.

CAIRES, E. F. et al. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, Madson, v. 24, p. 302-309, 2008.

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

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**, Madson, v. 27, p. 45-53, 2010.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 743-753, 2003.

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**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. **Agronomy Journal**, Madson, v. 105, p. 1393-1403, 2013.

DALLA NORA, D. et al. Formação de um perfil de enraizamento profundo e a estabilidade da produtividade de culturas de grãos sob Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, Não-Me-Toque, v. 139, p. 1-11, 2014a.

DALLA NORA, et al. Subsoil chemical amelioration and crop yields under contínuos long-term no-till in a subtropical Oxisol. **African Journal of Agricultural Research**, Gauteng, v. 9, n. 45, p. 3338-3349, 2014b.

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Eschborn, Germany, 1991. 272p.

EMBRAPA. **Avaliação dos impactos do uso do gesso agrícola na cultura da soja em algumas áreas do Cerrado**. Embrapa Cerrados, Planaltina, 2010.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. **Absorção de nutrientes**. In: FERNANDES, M.S. (Ed.) *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 115-153.

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**, Viçosa, v. 30, p. 425-432, 2006.

HAWKESFORD, M. et al. **Functions of macronutrients**. In: MARSCHNER, P., ed. *Mineral nutrition of higher plants*, 3.ed. New York, Elsevier, 2012. p.171-178.

KAMINSKI, J. et al. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 573-580, 2005.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 395-401, 1995.

LOYOLA JR, E.; PAVAN, M.A. Seletividade de troca de cátions em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p. 131-138, 1989.

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

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 45, p. 251-256, 2002.

NAVA, G. et al. Soil Composition and nutritional status of apple as affected by long-term application of gypsum. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p.215-222, 2012.

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

QUAGGIO, J. A.; DECHEN, A. R.; RAIJ, B.van. Efeitos da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e a lixiviação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 6, p. 189-194, 1982.

RAIJ, B. VAN. Gesso na agricultura. São Paulo: IPNI – **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. 2010. (Informações Agronômicas 122).

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1687-1698, 2011.

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

RITCHEY, K. D. et al. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, Madson, v. 72, p. 40-44, 1980.

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.

SCHERER, E. E.; BALDISSERA, I. T.; NESI, C. N. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho sob plantio direto e adubação com esterco de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 123-131, 2007.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E., eds. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.81-96.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. **Uso do gesso agrícola nos solos dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA CPAC, 1996. p.20. (Circular Técnica n. 32).

SUMNER, M. E. et al. Amelioration of an acid soil prolife through deep liming and surface application of gypsum. **Soil Science Society of American Journal**, Madson, v. 50, p. 1254-1278, 1986.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre, Artmed, 2009. 819p.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Liming and ionic speciation of an Oxisol under no-till system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 190-203, 2008.

7. ANEXOS

Anexo A - Câmaras de exclusão de 30% da precipitação instaladas sobre os tratamentos de 0,0; 3,0 e 5,0 Mg ha⁻¹ de gesso aos 32 e 54 meses após aplicação dos tratamentos sobre a cultura da soja no Experimento I.



8. APÊNDICES

Apêndice A – Análise de variância dos atributos químicos do solo em relação aos tratamentos, profundidade e tempo de amostragem para os quatro Experimentos de estudo.

Causas de Variação	pH _{H2O}	S ⁽²⁾	Al ⁽¹⁾	Ca ⁽³⁾	Mg ⁽⁴⁾	K ⁽⁵⁾	Sat. Al	V%	Sat. Ca
		mg dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----			----- % -----			
Experimento I									
Trats,	ns	*	*	**	*	ns	*	*	*
Tempo	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
Trats. X Tempo	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*
CV (%)	8,44	26,28	39,84	26,10	17,60	37,08	33,28	26,82	29,03
Experimento II									
Trats,	ns	**	*	**	*	*	**	**	**
Tempo	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
Trats. X Tempo	ns	**	ns	ns	ns	ns	*	*	*
CV (%)	7,78	35,63	29,3	43,32	24,40	46,92	41,23	24,44	34,83
Experimento III									
Trats,	ns	**	*	*	*	*	*	*	*
Tempo	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
Calcário X Gesso	ns	ns	*	*	*	ns	*	*	ns
Trats. X Tempo	ns	*	*	*	ns	ns	*	*	*
CV (%)	8,13	23,06	37,80	17,80	38,57	37,97	28,56	38,68	16,58
Experimento IV									
Gesso	ns	*	*	*	ns	ns	*	*	*
Calcário	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Calcário X Gesso	ns	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Tempo	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	*	*
Gesso X Calcário X Tempo	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
CV (%)	19,82	36,88	32,05	29,32	26,65	66,39	28,10	44,32	33,2

^{ns} Não significativo; * Significativo a 5%; ** Significativo a 1% ⁽¹⁾Alumínio, ⁽²⁾ Enxofre, ⁽³⁾ Cálcio, ⁽⁴⁾ Magnésio, ⁽⁵⁾ Potássio, CV= coeficiente de variação

Apêndice C – Efeito dos Tratamentos sobre os teores de magnésio e potássio para a última coleta realizada em cada Experimento.

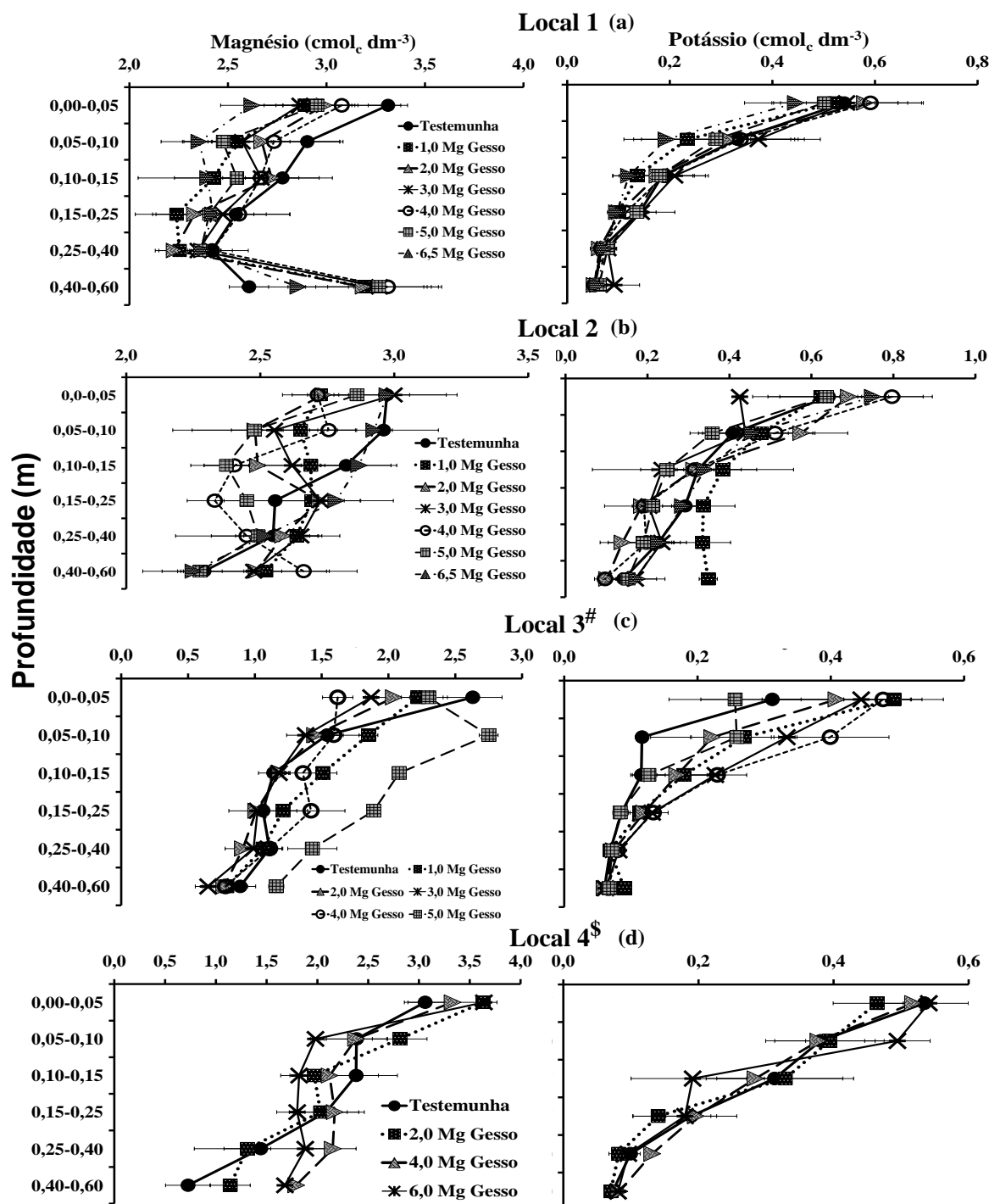


Figura 1: Efeito das doses de gesso sobre os teores de magnésio e potássio para o Experimento I após 56 meses (a), Experimento II após 56 meses (b), Experimento III após 30 meses e Experimento IV após 30 meses da aplicação dos tratamentos. [#]Médias dos teores de Mg e de K entre os tratamentos que receberam calcário e os tratamentos que não receberam; [§]Médias dos teores de Mg e de K para as doses de gesso combinadas ao calcário.

Apêndice D – Efeito dos Tratamentos sobre as relações Ca/Mg e (Ca + Mg)/K para a última coleta realizada em cada Experimento.

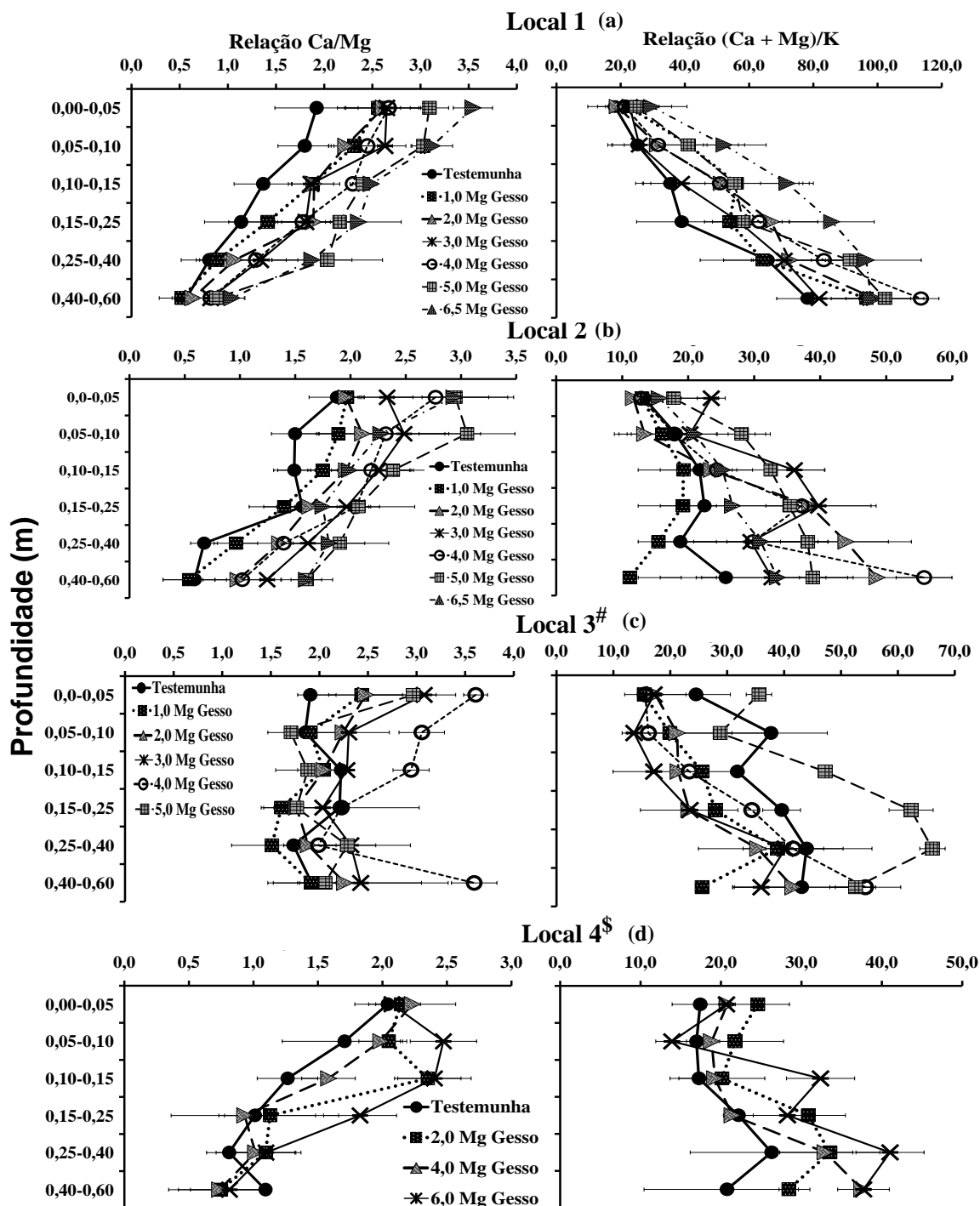


Figura 2: Efeito das doses de gesso sobre as relações Ca/Mg e (Ca + Mg)/K para o Experimento I após 56 meses (a), Experimento II após 56 meses (b), Experimento III após 30 meses e Experimento IV após 30 meses da aplicação dos tratamentos. [#]Médias das relações Ca/Mg e (Ca + Mg)/K entre os tratamentos que receberam calcário e os tratamentos que não receberam; ^{\$}Médias das relações Ca/Mg e (Ca + Mg)/K para as doses de gesso combinadas ao calcário.

Apêndice E – Efeito dos Tratamentos sobre a saturação por Ca, saturação por Mg e saturação por K para a última coleta realizada em cada Experimento.

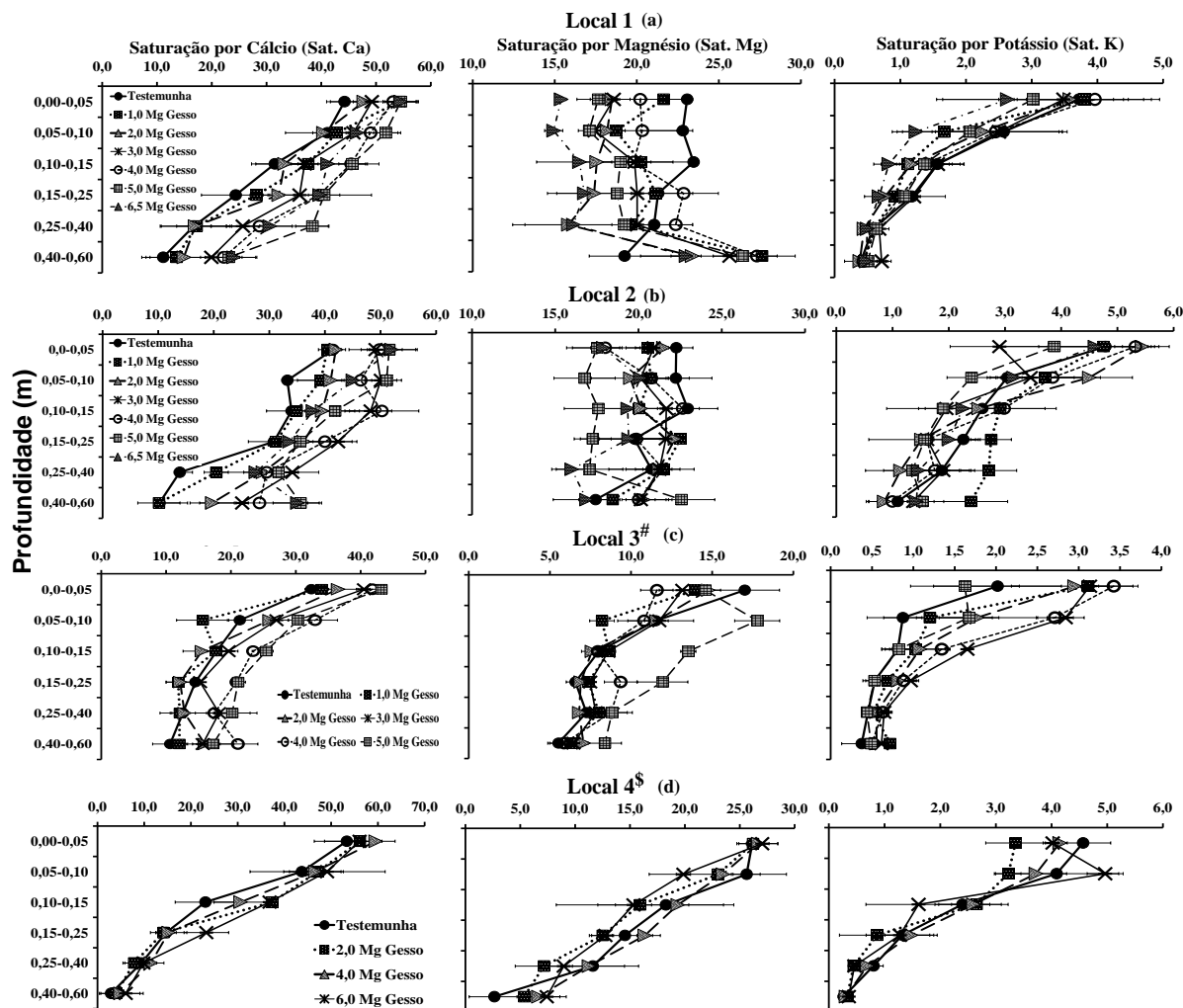


Figura 3: Efeito das doses de gesso sobre a saturação por Ca, saturação por Mg e saturação por K para o Experimento I após 56 meses (a), Experimento II após 56 meses (b), Experimento III após 30 meses e Experimento IV após 30 meses da aplicação dos tratamentos. #Médias da saturação por Ca, saturação por Mg e saturação por K entre os tratamentos que receberam calcário e os tratamentos que não receberam; §Médias da saturação por Ca, saturação por Mg e saturação por K para as doses de gesso combinadas ao calcário.