

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

**Douglas Dalla Nora**

**MELHORIA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DA CAMADA DE  
ENRAIZAMENTO E SEU EFEITO SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS  
CULTURAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Santa Maria, RS  
2017



Douglas Dalla Nora

**MELHORIA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO E  
SEU EFEITO SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM SISTEMA  
PLANTIO DIRETO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS  
2017

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 dos atributos químicos da camada de enraizamento e seu efeito sobre a produtividade das culturas em sistema plantio direto / Douglas Dalla Nora.- 2017.  
251 p.; 30 cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2017

1. Gesso 2. Calcário 3. Camada de enraizamento 4. Restrição hídrica 5. Cálcio I. Amado, Telmo Jorge Carneiro II. Título.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Douglas Dalla Nora. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: douglasdnpg@gmail.com

Douglas Dalla Nora

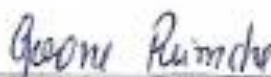
**MELHORIA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO E  
SEU EFEITO SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM SISTEMA  
PLANTIO DIRETO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de concentração Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

**Aprovado em 28 de junho de 2017:**



**Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr.**  
(Presidente/Orientador)



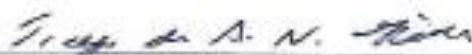
**Geovane Boschmann Reimche, Dr. (UFSM)**



**Jackson Ernani Fiorin, Dr. (CCGL TEC e UNICRUZ)**



**Rafael Pivotto Bortolotto, Dr. (UNICRUZ)**



**Tiago de Andrade Neves Hörbe, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2017.



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Roque Dalla Nora e Delonir Dávila pelo apoio no decorrer dessa caminhada.

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

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, mestrado e doutorado.

A todos os colegas do Laboratório de Uso, Manejo e Conservação do Solo que, de alguma maneira, auxiliaram em minha formação.

Vocês fazem parte de minha conquista!

Obrigado!





## RESUMO

### MELHORIA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO E SEU EFEITO SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

Autor: Douglas Dalla Nora

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado

A adoção do sistema plantio direto provocou diversas melhorias físicas, químicas e biológicas no solo. Contudo, essas melhorias têm se restringido às camadas superficiais do solo, limitando o desenvolvimento radicular em subsuperfície. O presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do gesso aplicado isoladamente ou combinado com calcário na melhoria química da camada de enraizamento do solo comparado a métodos de manejo físicos e químicos e seu efeito no crescimento e produtividade das culturas em SPD sob situações de precipitação normal e sob déficit hídrico induzido. Foram realizados cinco experimentos iniciais seguidos de mais dois experimentos agregados aos iniciais, todos em Latossolos Vermelhos distróficos manejados sob SPD no RS entre 2009 a 2016. 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<sup>-1</sup> de gesso. Outros dois experimentos foram implantados em São Miguel das Missões e Tupanciretã em 2011. Em São Miguel das Missões utilizou-se um delineamento com parcelas subdivididas, as parcelas principais foram compostas por doses de gesso variando de 0,0 a 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>, e as subparcelas compostas pelos tratamentos sem calcário e na dose de 2,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Em Tupanciretã, o experimento foi composto por parcelas subdivididas, as parcelas principais foram compostas por doses de gesso variando de 0,0 a 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>, e as subparcelas variaram 0,0 a 4,8 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário. Em Palmeira das Missões foi implantado o quinto experimento em 2013 sendo composto por um delineamento com parcelas subdivididas, as parcelas principais foram compostas por doses de gesso variando de 0,0 a 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>, e as subparcelas com quatro doses de calcário variando de 0,0 a 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Em São Miguel das Missões um sexto experimento foi instalada a partir da subdivisão das parcelas com a restrição de 100 % da precipitação. Em Palmeira das Missões foram adicionados novos tratamentos que compuseram um sétimo experimento, os tratamentos basearam-se em reaplicações de gesso e calcário e incorporação de calcário. As amostragens de solo foram feitas estratificadamente na camada de 0,00-0,60 m. Verificou-se incremento nos teores de Ca<sup>2+</sup> e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em todo o perfil, além de redução na saturação por Al<sup>3+</sup> e aumento na SB e na saturação por Ca<sup>2+</sup>. Pela melhoria da qualidade química da camada de enraizamento foi verificado aumento da produtividade da soja, milho e trigo. Nos experimentos com melhor qualidade química, as camadas amostrais em que houve relação com a produtividade situavam-se em maiores profundidades (camada de 0,25-0,40 m para o Exp. I e de 0,00-0,40 m para o Exp. II). Nos experimentos com pior qualidade química as camadas amostrais que apresentaram relação com a produtividade situavam-se mais próximas da superfície (camada de 0,00-0,10 m para o Exp. III e de 0,00-0,25 m para o Exp. IV). O incremento na quantidade de grãos produzida por mm de chuva, decorrente da aplicação de gesso, foi maior quando houve déficit hídrico no período crítico das culturas. A melhoria química da camada de enraizamento atenuou a perda de produtividade da soja e milho associada à restrição hídrica. O incremento do teor de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> apresentou relação significativa com o aumento dos teores de Ca<sup>+2</sup> nas camadas mais profundas. Considerando um tempo de retorno econômico de cinco a seis anos, a dose de gesso que maximiza a produtividade das culturas de soja, milho e trigo é de 4,4 Mg ha<sup>-1</sup>. Foram constatados incrementos de produtividade similares quando o calcário foi incorporado ou aplicado em superfície, ainda a aplicação parcelada do calcário não afetou a produtividade, sendo a dose calibrada para atingir 70 % de SB na camada de 0,00-0,20 m a mais adequada.

**Palavras-Chave:** Gesso. Calcário. Camada de enraizamento. Restrição hídrica. Cálcio.



## ABSTRACT

Doctor Qualification  
Graduate Program in Soil Science  
Federal University of Santa Maria

### IMPROVEMENT OF CHEMICAL ATTRIBUTES OF THE ROOT LAYER AND ITS EFFECT IN CROP GRAIN YIELD UNDER NO-TILLAGE

AUTHOR: Douglas Dalla Nora

ADVISOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

Date and Local of the Qualification: Santa Maria, september 26th 2016.

The adoption of no-tillage system led to several physical, chemical and biological improvements in the soil. However, these improvements have been restricted to the superficial layers of the soil, limiting the root development in subsurface. This study aimed to evaluate the effect of the gypsum applied alone or in combination with lime in the chemical improvement of soil root layer compared to physical and chemical management methods and their effect on growth and crop yield in no-till under normal rainfall conditions and under induced drought. Were made five initial experiments followed by two experiments aggregates to initials, all in Typic Hapludoxs managed under no-till in RS State between 2009 to 2016. The experimental design was a randomized block design with three replications. Two experiments were established in 2009 in Carazinho with treatments ranging from 0.0 to 6.5 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum. Two experiments were implemented in São Miguel das Missões and Tupanciretã in 2011. In São Miguel das Missões used a split plot design, the main plots were composed of gypsum doses ranging of 0.0 to 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>, and subplots without lime and rate of 2.0 Mg ha<sup>-1</sup>. In Tupanciretã used a split plot design, the main plots were composed of gypsum doses ranging from 0.0 to 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> and subplots ranging of 0.0 to 4.8 Mg ha<sup>-1</sup>. In Palmeira das Missões was deployed the fifth experiment in 2013 and consists of split plot design, the main plots were composed of gypsum doses ranging from 0.0 to 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> and subplots ranging of 0.0 to 6.0 Mg ha<sup>-1</sup>. In São Miguel das Missões sixth experiment was installed from the subdivision of plots with the restriction of 100 % of the precipitation. Palmeira das Missões have added new treatments composing a seventh experiment, the treatments were based on reapplication of gypsum and lime, lime incorporation. The soil samples were made in the stratified layer of 0.00 to 0.60 m. There was increase in levels of Ca<sup>2+</sup> and S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in the profile, and reduce the saturation of Al<sup>3+</sup> and increase in BS and Ca<sup>2+</sup> saturation. By improvement of chemical quality rooting layer was found increased yield of soybean, corn and wheat. In experiments with better chemical quality, the layers that were related to yield stood at greater depth (layer of 0.25-0.40 m for the Exp. I and 0.00 to 0.40 m in Exp. II). In the experiments with worse chemical quality the layers that were related to the yield were located closer to the surface (layer of from 0.00 to 0.10 m for the Exp. III and 0.00 to 0.25 m to Exp. IV). The increase in the amount of grain produced per mm of rain, resulting from the application of gypsum, was higher when there was drought in the critical period of crop. The chemical improvement of rooting layer attenuated soybean and corn yield loss associated with water restriction. The results of Study V and VI are still under evaluation. The increase in the content of S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> showed a significant relationship with the increase of the Ca<sup>+2</sup> contents in the deeper layers. Considering an economic recovery time of five to six years, the rate of gypsum that maximizes the soybean, maize and wheat crops yield is 4.4 Mg ha<sup>-1</sup>. Similar increments of the yield were recorded when lime was incorporated or applied to the surface, although the lime application did not affect the yield, and the rate was calibrated to reach 70% SB in the 0.00-0.20 m layer.

**Keywords:** Gypsum. Lime. Root layer. Water restriction. Calcium.



## LISTA DE FIGURAS

### INTRODUÇÃO GERAL

Figura 1. Canal de desenvolvimento de raiz de canola (3 de maio - entressafra) serviu como caminho preferencial para o posterior desenvolvimento radicular da soja (17 de julho, safra), cultivada em sucessão, nos Estados Unidos. (Adaptado de Dalla Nora et al., 2014).....31

### MATERIAL E MÉTODOS

Figura 2. Localização dos experimentos em seus respectivas municípios no Estado do RS.....41

Figura 3. Croqui do desenho experimental de um bloco do Exp 1.....44

Figura 4. Croqui do desenho experimental de um bloco do Exp 3.....46

Figura 5. Croqui do desenho experimental de um bloco do Exp 4.....47

Figura 6. Croqui do desenho experimental de um bloco do Exp 5.....48

### ESTUDO I

Figure 1. Daily and cumulative precipitation during the experimental period for the Experiments I, II, III and IV, beyond of evaluated crops in the experiments. Source: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).....76

Figure 2. Effect of gypsum rates on calcium and sulfur in the Experiment I after 56 months (a), in Experiment II after 56 months (b), in Experiment III after 30 months (c) and Experiment IV after 30 months (d) the application of treatments. # Average of sulfur and calcium between treatments with lime and the treatments that did not receive due to the significant interaction between rates of gypsum and lime; \$ Averages of sulfur and calcium for gypsum rates combined 3.6 Mg ha<sup>-1</sup> of lime due to the interaction between rates of gypsum and lime. Error bars represent 95% confidence limits for the average.....77

Figure 3. Time Effect of rates 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum on the saturation Ca (a), base saturation (b) and Al saturation (c) for Experiment I. \* Significant at 5% error probability; \*\* Significant at 1% probability of error.....78

Figure 4. Time effect of rates 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum rates on the saturation Ca (a), base saturation (b) and Al saturation (c) for Experiment II. \* Significant at 5% error probability; \*\* Significant at 1% probability of error.....79

Figure 5. Time effect of rates 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum on the saturation Ca (a), base saturation (b) and Al saturation (c) for Experiment III. <sup>ns</sup>Not significant at 5% error probability; Equal letters on the bars for the same depth do not differ significantly at 5% probability of error.....80

Figure 6. Time effect of rates 0.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum; 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum and 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum + 3.6 Mg ha<sup>-1</sup> of lime on the saturation Ca (a), base saturation (b) and Al saturation

(c) for Experiment IV. <sup>ns</sup>Not significant at 5% error probability; Equal letters on the bars for the same depth do not differ significantly at 5% probability of error.....81

## ESTUDO II

Figure 1. Daily and cumulative precipitation during the experimental period for the Experiments I, II, III and IV. Source: Instituto Nacional de Meteorologia.....108

Figure 2. Average yield of the check plots of corn (a), wheat (b) and soybean (c).....109

Figure 3. Yield of soybeans, corn and wheat for Experiment I (a), Experiment II (b), Experiment III (c) and Experiment IV (d) in relationship to the singly gypsum rates or combined with the lime. \*Significant at 5% error probability; \*\*Significant at 1% probability of error.....110

Figure 4. Relationship between relative soybean yield (a), wheat (b), corn (c) and all crops together (d) for all experiments together with the isolated gypsum rates or combined with the lime. \* Significant at 5% error probability; \*\* Significant at 1% error probability.....111

Figure 5. Relationship between the relative yield of soybeans, corn and wheat with base saturation (BS) and Al saturation in the layer of 0.25-0.40 m for the Experiment I (a); between the relative yield of soybean, corn and wheat, with BS and Al saturation in the layer of 0.00 to 0.40 m for the Experiment II (b); between the relative yield of soybean and wheat with BS and Al saturation in the layer of 0.00 to 0.10 m for Experiment III (c); between the relative yield of soybean and wheat with BS and Al saturation in the layer of 0.00 to 0.25 m for Experiment IV (d).....112

## ESTUDO III

Figure 1. Daily and cumulative rainfall during the experimental period for experiments I, II, III and IV, located in Carazinho, Carazinho, São Miguel das Missões and Tupanciretã, respectively Besides the cultivated crops and the soil and plant samples made in their experiments. Source: INMET.....153

Figure 2. Relation between grain quantity of corn, wheat, and soybeans (kg) per mm precipitated during the critical period without water stress (a) and with water stress (b) with isolated gypsum or combined with lime in Experiments I II, III and IV. \* Significant at 5% error probability; \*\* Significant at 1% error probability.....154

Figure 3. Base and Al<sup>3+</sup> saturation at 32 months (a) and 56 months (b) after the treatment application in Experiment I. The collection times refers to the period of installation of rainfall exclusion cameras. Minimum difference statistical (MDS) by the 5% Tukey test probability of error.....155

Figure 4. Soybean yield in 2011/12 with the exclusion of 30% and without exclusion of precipitation 32 months after application of 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum (A) and relative yield for the same period (B). Soybean yield in 2013/14 harvest with the exclusion of 30% of precipitation and without exclusion 54 months after the application of 0.0; 3.0 to 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> rates of gypsum (C) and relative yield for the same period (D).....156

## ESTUDO IV

Figura 1. Precipitação diária e acumulada desde a implantação do experimento e precipitação ao longo do período de exclusão da precipitação durante os períodos críticos da soja e milho.....164

Figura 2. Teor de Enxofre e relação Ca/Al 30 meses após a aplicação de gesso e 12 meses após a aplicação calcário (a) e após 54 meses da aplicação de gesso e 12 meses após a reaplicação de calcário (b). Diferença mínima estatística (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.....171

Figura 3. Saturação por base, saturação por Al e saturação por Ca 30 meses após a aplicação de gesso e 12 meses após a aplicação calcário (a) e após 54 meses da aplicação de gesso e 12 meses após a reaplicação de calcário (b). Diferença mínima estatística (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.....173

Figura 4. Produtividade da soja na safra 2014/15 afetada pela aplicação de gesso e calcário sobre efeito ou não da exclusão da precipitação (a) e produtividade da soja relativa ao tratamento com 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário sem exclusão da precipitação (b). Produtividade do milho na safra 2015/16 afetada pela aplicação de gesso e calcário sobre efeito ou não da exclusão da precipitação (a) e produtividade do milho relativa ao tratamento com 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário sem exclusão da precipitação (b). Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas colunas para os tratamentos com gesso e calcário na mesma situação hídrica não diferiram entre si pelo teste F. Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas para o mesmo tratamento com e gesso e calcário na presença ou não da restrição hídrica não diferiram entre si pelo teste F.....178

Figura 5. Gráfico Biplot dos fatores principais da análise fatorial após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser dos atributos relacionados ao crescimento e produtividade da cultura da soja sem (a) e com (b) restrição da precipitação e da cultura do milho sem (c) e com (d) restrição da precipitação.....180

Figura 6. Gráfico Biplot dos fatores principais da análise fatorial após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser dos atributos químicos do solo e produtividade da cultura da soja sem (a) e com (b) restrição da precipitação e da cultura do milho sem (c) e com (d) restrição da precipitação.....183

Figura 7. Relação entre produtividade da soja e o NDVI e IAF na ausência (a) ou presença (b) da exclusão da precipitação. Relação entre produtividade da soja e os grãos por legume e peso de 1000 grãos na ausência (c) ou presença (d) da exclusão da precipitação. Relação entre produtividade da soja e o teor de cálcio e nitrogênio foliar na ausência (d) ou presença (e) da exclusão da precipitação. ns Não significativo; \* e \*\* significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.....186

Figura 8. Relação entre produtividade do milho e o NDVI e IAF na ausência (a) ou presença (b) da exclusão da precipitação. Relação entre produtividade do milho e número de fileiras e peso de 1000 grãos na ausência (c) ou presença (d) da exclusão da precipitação. Relação entre produtividade milho e o teor de cálcio e nitrogênio foliar na ausência (d) ou presença (e) da exclusão da precipitação. ns Não significativo; \* e \*\* significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.....188

Figura 9. Relação entre saturação por bases e saturação por Ca com a produtividade da soja sem exclusão da precipitação (a) e relação entre saturação por bases e saturação por Al com a produtividade da soja com exclusão da precipitação (b). Relação entre saturação por bases e saturação por Ca com a produtividade do milho sem exclusão da precipitação (c) e relação entre saturação por bases e saturação por Al com a produtividade do milho com exclusão da precipitação (d). \* significativo a 5% pelo teste F.....190

## ESTUDO V

Figura 1. Precipitação diária e acumulada desde a implantação do experimento. ....202

Figura 2. Relação entre o teor de Cálcio e o teor de Enxofre nas diferentes camadas após 30 meses da aplicação do gesso no experimento 3 em São Miguel das Missões. \* significativo a 5% pelo teste F.....211

Figura 3. Relação entre os teores de Cálcio de cada camada (variável independente “x”) e a camada imediatamente inferior (variável dependente “y”) após 30 meses da aplicação do gesso no experimento 3 em São Miguel das Missões. \* e \*\* significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.....212

Figura 4. Modelo conceitual da reação do gesso ao longo do perfil do solo baseado em resultados obtidos com a dose de 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso após 30 meses da aplicação no Exp 3 em Tupanciretã.....214

Figura 5. Máxima eficiência técnica e máxima eficiência econômica entre as doses de gesso e a produtividade relativa das culturas de soja, trigo e milho dos cinco experimentos avaliados. \*\*\*\* significativo a 0,0001%, respectivamente, pelo teste F.....216

Figura 6. Relação entre as doses de gesso com o teor relativo de Cálcio foliar (a) e Nitrogênio foliar (b) das culturas de soja, milho e trigo ao longo do período experimental nos cinco experimentos avaliados. \*\*\*\* significativo a 0,0001%, respectivamente, pelo teste F.....218

## ESTUDO VI

Figura 1. Precipitação diária e acumulada desde a implantação do experimento.....228

Figura 2. Saturação por bases (a) e saturação por Al<sup>3+</sup> (b) afetadas por diferentes formas de aplicação de calcário e de gesso. Testemunha (T0); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário incorporado no ano de 2015 (T1); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T2); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T3); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário superficial no ano de 2013 (T4); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T5); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T6); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T7); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T8); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T9) e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T10).....234

Figura 3. Produtividade da soja (a) e peso de 1000 grãos (b) afetados por diferentes formas de aplicação de calcário e de gesso. Testemunha (T0); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário incorporado no ano



de 2015 (T1); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T2); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T3); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário superficial no ano de 2013 (T4); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T5); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T6); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T7); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T8); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T9) e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T10).....237

Figura 4. NDVI e IAF da soja afetada por diferentes formas de aplicação de calcário (a) e diferentes formas de aplicação de gesso (b). Testemunha (T0); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário incorporado no ano de 2015 (T1); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T2); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T3); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário superficial no ano de 2013 (T4); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T5); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T6); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T7); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T8); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T9) e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T10).....239



## LISTA DE TABELAS

### MATERIAL E MÉTODOS

Tabela 1. Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude e precipitação anual.....	42
Tabela 2 - Atributos químicos avaliados anteriormente a implantação dos tratamentos nas áreas experimentais.....	43

### ESTUDO I

Table 1: Location of the experiments with its coordinates, altitude, annual precipitation and acreage of soybeans in RS.....	72
Table 2. Crop sequence performed in Experiments I, II, III and IV, addition of the crop cycle, fertilizer used and the time of evaluation of the yield.....	73
Table 3. Soil chemical attributes before implementation of the treatments in the four experimental areas in dystrophic Oxisol managed under no-tillage system in the RS.....	74
Table 4. Response probability classes liming, gypsum and sulfur for the four experiments and depth of transition from chemical quality.....	75

### ESTUDO II

Table 1. Crop sequence cultivated in Experiments I, II, III and IV, besides the crop cycle, fertilizer used and the time of evaluation of productivity.....	105
Table 2. Soil chemical attributes before implementation of the treatments in the four experimental areas in dystrophic Oxisol managed under no-tillage system in the Rio Grande do Sul.....	106
Table 3. Accumulated yield of six harvests for the Experiment I, five harvests for the Experiment II, four harvests for the Experiment III and two harvests for the Experiment IV...	107

### ESTUDO III

Table 1. Crop sequence in Experiments I, II, III and IV, crop cycle, fertilizer used, and the time of evaluation of productivity.....	157
Table 2. Chemical attributes evaluated before initiation of the experiments for the four experimental areas.....	158
Table 3. Total, normal and ideal precipitation (mm) during the crop cycle and the critical growth period of crops in Experiments I, II, III and IV. Source: INMET.....	159
Table 4. Regression between BS and Al <sup>+3</sup> saturation with rates of isolated gypsum for Experiment I and Experiment II after 56 months and 30 months after the application of gypsum combined with lime in Experiments III and IV.....	160

## **ESTUDO IV**

Tabela 1. Atributos químicos do solo avaliados antes da implantação dos tratamentos em um Latossolo distrófico manejado sob sistema plantio direto no RS.....165

Tabela 2. Umidade volumétrica ( $\theta$ ) do solo afetada pela presença ou ausência da exclusão da precipitação nos tratamentos com gesso aplicado isoladamente ou combinado ao calcário.....175

Tabela 3. Comunalidades após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser para os resultados de produtividade e atributos de planta nas safras de 2014/15 e 2015/16 na ausência ou presença de restrição da precipitação.....181

Tabela 4. Comunalidades após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser para os resultados de produtividade e atributos de solo nas safras de 2014/15 e 2015/16 na ausência ou presença de restrição da precipitação.....184

## **ESTUDO V**

Tabela 1. Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude e precipitação anual.....200

Tabela 2. Atributos químicos avaliados anteriormente a implantação dos tratamentos nas áreas experimentais.....201

## **ESTUDO VI**

Tabela 1. Atributos químicos avaliados anteriormente a implantação dos tratamentos nas seis áreas experimentais.....229

Tabela 2. Efeito dos tratamentos com gesso e calcário sobre os nutrientes foliares da cultura da soja.....240

## Lista de Abreviações

Al <sup>3+</sup>	– Alumínio
Ca <sup>2+</sup>	– Cálcio
CE	– Camada de Enraizamento
CQFS-RS/SC	– Comissão de Química e Fertilidade do Solo
CTC	– Capacidade de Troca de Cátions
F <sup>-</sup>	– Fluor
Mg <sup>2+</sup>	– Magnésio
N	– Nitrogênio
PRNT	– Poder Relativo de Neutralização Total
K <sup>+</sup>	– Potássio
P	– Fósforo
PR%	– Produtividade Relativa
RS	– Rio Grande do Sul
PR	– Paraná
Sat. por Al	– Saturação por Alumínio
Sat. por Ca	– Saturação por Cálcio
S	– Enxofre
S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	– Sulfato
SPD	– Sistema Plantio Direto
SB	– Saturação por bases
Exp	– Experimento
MET	– Máxima Eficiência Técnica
MET	– Máxima Eficiência Econômica



## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	27
1.1. Estratégias para formação de uma camada de enraizamento adequada .....	29
1.1.1. Estratégias Biológicas.....	29
1.1.2. Estratégias Químicas.....	31
1.2. Efeito do gesso isolado ou combinado ao calcário sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas de grãos .....	33
2. HIPÓTESES .....	37
3. OBJETIVOS .....	39
3.1. Objetivo Geral .....	39
3.2. Objetivos específicos.....	39
4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL .....	41
4.1. Descrição das áreas de estudo .....	41
4.1.1. Descrição dos experimentos de longa duração .....	43
4.1.2. Descrição dos experimentos de média duração .....	45
4.1.3. Descrição do experimento recentemente implantado .....	47
4.1.4. Definição dos tratamentos .....	49
4.1.5. Descrição das principais avaliações realizadas.....	49
4.1.6. Análise estatística .....	50
5. ARTIGO I - ALLEVIATE THE GRADIENT OF CHEMICAL ATTRIBUTES IN ROOTING ZONE OF DYSTROPHIC OXISOLS BY GYPSUM AND LIME INPUTS UNDER NO-TILL*.....	51
5.1. ABSTRACT.....	51
5.2. RESUMO:.....	52
5.3. INTRODUCTION.....	53
5.4. MATERIALS AND METHODS .....	55
5.4.1. Description of the experimental areas .....	55
5.4.2. Experimental design .....	56
5.4.3. Sampling and main assessments .....	56
5.4.4. Statistical analysis.....	57
5.5. RESULTS AND DISCUSSION .....	57
5.5.1. Characterization of soil chemical attributes at the beginning of the experiments.....	57
5.5.2. Improvement in chemical attributes in the RZ associate to lime and gypsum input.....	59
5.5.3. Temporal evolution of soil chemical attributes in the RZ by gypsum and lime input.....	62
5.6. CONCLUSIONS .....	67
5.7. REFERENCES.....	67
6. ARTIGO II - MODERN HIGH YIELD MAIZE, WHEAT AND SOYBEAN CULTIVARS AFFECTED BY GYPSUM AND LIME APPLICATION IN NO-TILL OXISOL.....	83
6.1. ABSTRACT.....	83
6.2. RESUMO .....	84
6.3. INTRODUCTION.....	85
6.4. MATERIALS AND METHODS .....	87
6.4.1. Description of the experimental areas .....	87
6.4.2. Experimental Design.....	88
6.4.3. Soybean, wheat and maize cultivars .....	89

6.4.4.	Description of the main evaluations .....	89
6.4.5.	Statistical analysis .....	90
6.5.	<b>RESULTS AND DISCUSSION</b> .....	90
6.5.1.	Soybean, maize and wheat yield in the control treatment .....	90
6.5.2.	Crop yield response to gypsum and lime inputs .....	91
6.5.3.	Crop responses to gypsum and lime applications in soils with high chemical quality in the RZ .....	91
6.5.4.	Crop responses to gypsum and lime applications in soils with low chemical quality or abrupt quality transitions in the RZ .....	93
6.5.5.	Accumulated production of grain crops affected by gypsum and lime input .....	96
6.5.6.	Relative yield of grain crops affected by gypsum rates .....	97
6.5.7.	Relationships between soil layer and crop yield and its critical chemical attributes .....	98
6.6.	<b>CONCLUSIONS</b> .....	99
6.7.	<b>REFERENCES</b> .....	100
7.	<b>ARTIGO III - Precipitation use efficiency in rainfed grain crops by alleviation of subsoil acidity in no-till Oxisols</b> .....	113
7.1.	<b>ABSTRACT</b> .....	113
7.2.	<b>MATERIAL AND METHODS</b> .....	116
7.2.1.	Description of the experimental areas .....	116
7.2.2.	Experimental Design .....	118
7.2.3.	Main soil and crop evaluations .....	119
7.2.4.	Chambers for partial natural precipitation exclusion .....	120
7.2.5.	Classification of the precipitation: observed, normal and ideal for grain crops .....	120
7.2.6.	Statistical analysis .....	121
7.3.	<b>RESULTS AND DISCUSSIONS</b> .....	122
7.3.1.	Characterization of the soil chemical attributes at the experiment installation .....	122
7.3.2.	Improvement of subsurface chemical attributes by surface application of gypsum and lime .....	124
7.3.3.	Temporal variability of precipitation in the investigated experimental fields .....	129
7.3.4.	Relationship between the precipitation use efficiency and chemical quality of subsurface layers of Oxisols .....	130
7.3.5.	Gypsum role in mitigating induced water stress effect in soybean yield .....	135
7.4.	<b>CONCLUSIONS</b> .....	139
7.5.	<b>REFERENCES</b> .....	140
8.	<b>ARTIGO IV – FORMAÇÃO DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO COMO ALTERNATIVA PARA ATENUAR OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA E MILHO</b> .....	161
8.1.	Resumo .....	161
8.2.	Introdução .....	162
8.3.	Material e Métodos .....	163
8.3.1.	Descrição da área de estudo .....	163
8.3.2.	Definição dos tratamentos e delineamento experimental .....	165
8.3.3.	Avaliação da exclusão da precipitação .....	166



8.3.4.	Descrição das principais avaliações realizada nas áreas experimentais.....	166
8.3.5.	Análise estatística .....	168
8.4.	Resultados e Discussão .....	169
8.4.1.	Caracterização inicial dos atributos químicos quando da implantação dos experimentos.....	169
8.4.2.	Melhoria dos atributos químicos com aplicação de gesso e calcário..	170
8.4.3.	Efeitos do gesso e calcário sobre o crescimento das plantas com exclusão ou não da precipitação .....	173
8.5.	Conclusões .....	190
8.6.	Referências Bibliográficas .....	191
9.	<b>ARTIGO V – PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO E MECANISMOS DE DESCIDA DO CÁLCIO COM APLICAÇÃO DE GESSO.....</b>	<b>197</b>
9.1.	Resumo.....	197
9.2.	Introdução.....	197
9.3.	Material e Métodos.....	199
9.4.	Descrição das áreas de estudo .....	199
9.4.1.	Descrição dos experimentos de longa duração .....	202
9.4.2.	Descrição dos experimentos de média duração .....	204
9.4.3.	Descrição do experimento recentemente implantado .....	205
9.4.4.	Definição dos tratamentos .....	205
9.4.5.	Definição da Máxima Eficiência Técnica e Máxima Eficiência Econômica.....	206
9.4.6.	Descrição das principais avaliações realizadas.....	207
9.4.7.	Análise estatística .....	207
9.5.	Resultados e Discussão .....	208
9.5.1.	Caracterização inicial das áreas experimentais.....	208
9.5.2.	Dinâmica da descida do Cálcio ao longo do perfil do solo pela aplicação do gesso	209
9.5.3.	Modelo conceitual da melhoria da qualidade dos atributos químicos em subsuperfície.....	213
9.5.4.	Relação entre as doses de gesso e a produtividade relativa das culturas.....	214
9.6.	Conclusão .....	219
9.7.	Referências Bibliográficas .....	219
10.	<b>ARTIGO VI – ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO DE GESSO E CALCÁRIO E SEU EFEITO SOBRE A PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO.....</b>	<b>225</b>
10.1.	Resumo.....	225
10.2.	Introdução.....	226
10.3.	Material e Métodos.....	227
10.3.1.	Descrição da área de estudo.....	228
10.3.2.	Delineamento Experimental .....	229
10.3.3.	Definição dos tratamentos .....	230
10.3.4.	Descrição das principais avaliações.....	230
10.3.5.	Análise Estatística.....	231
10.4.	Resultados e Discussão .....	231
10.4.1.	Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos do solo.....	231

10.4.2.	Efeito dos tratamentos sobre os atributos de crescimento de planta e produtividade.....	234
10.5.	Conclusões.....	241
10.6.	Referências Bibliográficas.....	241
11.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	245
12.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	247

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Com a adoção do Sistema Plantio Direto (SPD), melhorias na qualidade química, física e biológica do solo vêm sendo observadas nas áreas agrícolas de diferentes regiões do Brasil. Aliado ao SPD, a utilização de cultivares mais precoces e produtivas e o maior uso de adubos e corretivos tem proporcionado a obtenção de produtividades cada vez mais elevadas das principais culturas agrícolas de grãos. Os resultados positivos obtidos sob SPD têm resultado em uma rápida expansão do sistema que alcança uma área próxima a 32 milhões de hectares na atualidade (CAIRES, 2012; ANJOS et al., 2012).

Os solos sobre os quais se desenvolvem os principais sistemas agrícolas produtivos no Brasil, sob condição natural, em geral, apresentam limitação química ao desenvolvimento das culturas, sendo classificados, em elevada frequência, como distróficos (SANTOS et al., 2006). Com a adoção do SPD aliado às novas tecnologias, no período compreendido entre 1990/91 a 2012/13, a produção agrícola cresceu 212% e a produtividade 127% (ANJOS et al., 2012). Dentre as vantagens do sistema destacam-se o controle do processo erosivo (COGO et al., 2003), o aumento e manutenção da matéria orgânica do solo (MOS) (BAYER et al., 2011), o aumento da água disponível e redução da temperatura do solo (AMADO et al., 2009) e a maior atividade biológica e nutrientes disponíveis para as plantas (CAIRES et al., 2005).

A aplicação superficial de fertilizantes, a elevada ciclagem de nutrientes proporcionada por culturas de cobertura, o incremento de MOS e a não inversão de camadas do solo tem sido apontadas como responsáveis pela formação de um acentuado gradiente de atributos químicos entre as camadas superficiais e subsuperficiais sob sistema plantio direto (DENARDIN et al., 2009). No entanto, deve-se destacar que naturalmente as camadas subsuperficiais dos Latossolos tropicais e subtropicais são ácidas e inférteis (SÁ et al., 2010).

A acidez do solo em camadas subsuperficiais, tem se destacado como um dos principais limitantes para a manutenção de elevadas produtividades em Latossolos ácidos, apresentando um efeito mais acentuado no desenvolvimento das plantas em situações de déficit hídrico de curta duração (COLEMAN; THOMAS, 1967), típicas do Estado do Rio Grande do Sul (RS) (DALLA NORA; AMADO, 2013). A acidez subsuperficial em Latossolos ácidos é decorrente da estratégia de correção da acidez do solo no SPD, a qual, geralmente é realizada a partir do uso de calcário aplicado na superfície do solo em doses parceladas ao longo do tempo baseadas em análises químicas da camada superficial do solo (0,0-0,10 m). Esta estratégia tem efeito limitado nas camadas mais profundas do solo devido a baixa solubilidade e as reduzidas doses de calcário aplicadas (RITCHEY et al., 1980; DALLA NORA et al., 2013). Este efeito ainda é

incrementado em situações de monocultivo com limitado aporte de resíduos vegetais ao solo (AMADO et al., 2009). Assim, a melhoria química das camadas subsuperficiais do solo, além da adição de insumos químicos, torna-se dependente da rotação de culturas e da utilização de plantas de cobertura, que contribuem para a formação de um perfil de solo com características químicas e físicas favoráveis ao desenvolvimento radicular.

Em diversas regiões do mundo, a produção agrícola é restringida pela acidez do solo, a qual se manifesta principalmente pela elevada toxicidade do alumínio ( $Al^{3+}$ ) e baixa saturação por bases (SB) (CLARK et al., 1997), sendo esses atributos determinantes para o desenvolvimento radicular das culturas anuais de grãos (COLEMAN; THOMAS, 1967; CAIRES et al., 2006; RAIJ, 2010), aumentando a vulnerabilidade das plantas em situações de déficit hídrico (COLEMAN; THOMAS, 1967).

Como alternativa para redução da atividade do  $Al^{3+}$  e aumento dos teores de cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e magnésio ( $Mg^{2+}$ ) em camadas subsuperficiais do perfil do solo, o gesso ( $CaSO_4^0$ ), subproduto da indústria do ácido fosfórico, vem sendo frequentemente aplicado em lavouras comerciais do Brasil (RAIJ et al., 2010). Devido a sua rápida solubilização, o gesso proporciona grande incremento do teor de  $Ca^{2+}$  na solução do solo que induz o deslocamento de  $Al^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$  e potássio ( $K^+$ ) do complexo de troca. Uma vez em solução, estes cátions ficam sujeitos ao deslocamento vertical pela água de drenagem no perfil do solo, especialmente o  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , devido sua afinidade na formação do par iônico com o sulfato ( $S-SO_4^{2-}$ ) (SUMNER et al., 1995). Além disso, o gesso favorece a formação do sulfato de  $Al^{3+}$ , composto menos tóxico às plantas (FAVARETTO et al., 2008).

Além do uso isolado do gesso, sua aplicação combinada ao calcário tem sido avaliada como a alternativa mais eficaz para o aprofundamento do sistema radicular, proporcionando maior eficiência no uso da água do solo (CAIRES et al., 2011a). O uso do calcário associado ao gesso atuam de forma sinérgica, pois o primeiro ao reduzir a acidez potencial e aumentar o pH da camada superficial (CAIRES et al., 1999), favorece a posterior ação do gesso no arraste de bases catiônicas no perfil do solo, notadamente do  $Ca^{2+}$  pela afinidade na formação do par iônico com o íon  $S-SO_4^{2-}$  (MARKET et al., 1987; RAIJ, 2010).

Quanto ao efeito do gesso no incremento da produtividade das culturas de grãos, os resultados de experimentos têm sido divergentes e dependentes do tipo de cultura investigada (RITCHEY et al., 1982; FARINA et al., 2000 a, b; ALLEONI et al., 2005; RAIJ 1994, 2010; CAIRES et al., 2004, 2011b). Assim, Farina et al. (2000a) avaliando o efeito do gesso por longo prazo (11 safras) encontrou incremento médio de  $345 \text{ kg ha}^{-1}$  na produtividade do milho. Em estudos recentes realizados por Dalla Nora e Amado (2013) e Dalla Nora et al. (2013) em

Latossolos do Estado do Rio Grande do Sul, os autores verificaram aumentos da produtividade das culturas de milho e soja com a aplicações de gesso isoladamente e gesso combinado com calcário.

Além do uso do gesso isoladamente ou combinado com calcário, outras estratégias para melhoria química das camadas subsuperficiais do solo tem sido estudadas, com maior destaque cita-se a incorporação do calcário, causando uma interrupção do SPD (KAMINSKI et al., 2005; BORTOLUZZI et al., 2014) e o uso da rotação de culturas e da utilização de plantas de cobertura (AMADO et al., 2009; URQUIAGA; ZAPATA, 2000).

### **1.1. Estratégias para formação de uma camada de enraizamento adequada**

A ocorrência de subsolos ácidos tem sido apontada como um dos principais fatores limitantes a obtenção de elevadas produtividades em solos tropicais (SHAINBERG et al., 1989; FARINA et al., 1997; 2000a, b). Portanto, a melhoria da qualidade química do perfil do solo tornou-se um desafio para produtores e seus assistentes técnicos (SUMNER, 1995; FARINA et al., 2000a), especialmente em ambientes sujeitos a déficit hídrico de curta duração. O assunto é complexo envolvendo uma interação de atributos químicos, físicos e biológicos. Assim, um solo agrícola com presença de camada compactada e com inferior qualidade química da camada subsuperficial, não será explorado eficientemente pelo sistema radicular das culturas. Neste contexto, a situação de não revolvimento do solo tende a manter esta condição por longo prazo. A consequência prática será a instabilidade da produtividade, de modo que as satisfatórias produtividades obtidas em anos de precipitação favorável conduzem a falsa impressão de que o problema inexistente (DALLA NORA et al., 2014).

#### **1.1.1. Estratégias Biológicas**

Estratégias biológicas como a utilização de culturas de cobertura em consórcio ou pastagens na entressafra e a adição frequente de adubação orgânica podem efetivamente contribuir para a formação de uma camada de enraizamento (CE) sob SPD. Porém, trata-se de um processo lento e dependente da dose de adubo orgânico utilizada e intensidade e qualidade dos cultivos de entressafra utilizados (BAYER et al., 2011).

Elevadas e frequentes quantidades de adubos orgânicos, além de suprir parcialmente as necessidades nutricionais das plantas, principalmente no que diz respeito ao N, também proporcionam o aumento dos teores de carbono (C) orgânico do solo (GIACOMINI; AITA,

2008) e o estímulo à atividade biológica. Em trabalho realizado por Correa et al. (2011) foi verificado um incremento de C até a camada de 0,40-0,60 m de profundidade, esse aporte de C e, conseqüente, liberação de ácidos orgânicos tendem a reduzir o efeito tóxico do Al nesta camada de solo, guardando certa semelhança com o processo que se verifica na camada superficial do solo com elevado aporte de resíduos vegetais (palhada). Além disso, o incremento de C em profundidade resulta em um ambiente mais propício para o desenvolvimento radicular. Em trabalho desenvolvido por Berwanger et al. (2008) com aplicações de dejetos de suíno em SPD, os autores relataram aumentos dos teores de fósforo (P) até a camada de 0,25 m de profundidade.

O uso efetivo de plantas de cobertura e da rotação de culturas, dois dos princípios básicos do SPD, estão entre os requisitos mais importantes para a formação de uma CE. O uso alternado de culturas de grãos com o cultivo de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo resulta na melhoria da estrutura do solo, além do aporte de N como é o caso das culturas do nabo forrageiro e da ervilhaca. O consórcio dessas culturas resulta no aumento da quantidade e da qualidade de resíduos aportados com reflexos positivos nas camadas de superfície e subsuperfície do solo (AMADO et al., 2009; URQUIAGA; ZAPATA, 2000). Como consequência do aumento do teor de C, há uma elevação da CTC e da biociclagem de nutrientes (AMADO et al., 2006). Nesse caso, além da melhoria dos atributos químicos, também ocorre à melhoria dos atributos físicos do solo a partir da formação e continuidade de canais que, favorecem a descida de compostos orgânicos e nutrientes até camadas mais profundas do perfil (AMADO et al., 2009). Um exemplo frequentemente observado em lavouras do RS é a formação de canais pelo sistema radicular do nabo forrageiro que favorece o crescimento das raízes do milho ou de trigo em sucessão. A ausência de preparo do solo, como no plantio direto contínuo, permite que esta condição física seja preservada e aproveitada pela cultura cultivada em sequência. Portanto, a presença de raízes das culturas de cobertura e de pastagens favorece o aprofundamento do sistema radicular das culturas de grãos cultivados em sucessão, devido aos exsudatos que são aportados ao solo estimulando a biota e a melhoria física e química do solo na área da rizosfera (AMADO et al., 2009). Na Figura 1, pode ser observado que a formação de um biocanal pela raiz da canola no mês de maio, possibilitou o crescimento de uma raiz de soja em julho do mesmo ano em um solo manejado sob SPD nos Estados Unidos.

Figura 1 - Canal de desenvolvimento de raiz de canola (3 de maio - entressafra) serviu como caminho preferencial para o posterior desenvolvimento radicular da soja (17 de julho, safra), cultivada em sucessão, nos Estados Unidos. (Adaptado de Dalla Nora et al., 2014)



Fonte: Dalla Nora (2017)

### 1.1.2. Estratégias Químicas

Em estudos anteriores, Caires (2012) sugeriu a melhoria da camada de enraizamento através da aplicação de uma única 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. A elevação do pH abaixo da zona de deposição do calcário somente ocorre após o pH da zona de dissolução atingir valores ao redor de 5,0 a 5,6 (HELYAR, 1991). Portanto, a aplicação de doses elevadas de calcário ou de doses menores, porém aplicadas de forma sequencial, é fundamental para que a zona de dissolução atinja rapidamente maiores valores de pH formando uma frente de alcalinização mais intensa. Alguns autores avaliando as camadas mais profundas do solo, definidas como abaixo dos 0,20 m, observaram que o calcário aplicado na superfície, em SPD, proporcionou alguma melhoria nas condições de acidez desta camada, entretanto foi necessário o uso de doses elevadas com frequente reaplicação ao longo tempo (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; CAIRES et al., 2008). No trabalho realizado por Oliveira e Pavan (1996) os autores concluíram que a aplicação em dose total na superfície ( $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) resultou em um leve aumento da produtividade quando comparado a aplicação parcial da mesma dose em quatro anos.

A reaplicação superficial de calcário em solo já corrigido com calagem na superfície pode facilitar a movimentação vertical do calcário no perfil do solo (CAIRES, 2012), embora esse efeito seja gradual e lento. De acordo com Caires (2012) os mecanismos que podem estar

envolvidos na melhoria das condições de acidez do subsolo a partir da calagem superficial em plantio direto são: (i) deslocamento vertical de partículas finas de calcário em decorrência das condições favoráveis de estruturação do solo, e (ii) mobilização química do calcário em formas inorgânicas, principalmente nas formas de sais de nitrato e sulfato, ou ainda, nas formas orgânicas. Ainda, de acordo com Caires (2012), em estudos realizados sob Latossolos no Estado do Paraná, foi verificado que o método da elevação da saturação por bases para 70%, em amostra de solo coletada na profundidade de 0,00–0,20 m, foi um parâmetro eficiente na determinação da dose de calcário a ser aplicada na superfície do solo em SPD. O autor ainda propõe que a dose de calcário prescrita possa ser aplicada sobre a superfície do solo em dose única ou de forma parcelada durante até três anos. Porém, o efeito de aplicação superficial de calcário na melhoria de atributos químicos de camadas subsuperficiais é bastante controverso na literatura, existindo relatos de efeito praticamente inexistente (BORTOLUZZI et al., 2014).

Uma alternativa tradicional para formação da CE proposta por alguns pesquisadores diz respeito à incorporação do calcário, notadamente em SPD com presença de acentuada transição química entre as camadas do solo (KAMINSKI et al., 2005; BORTOLUZZI et al., 2014). Em trabalho realizado por Kaminski et al. (2005), foi verificado que a aplicação de doses de calcário entre 2,0 e 17,0 Mg ha<sup>-1</sup>, incorporadas antes da instalação do SPD, apresentaram aumento dos teores de nutrientes ao longo do perfil além de neutralizar a acidez do solo de forma mais eficiente do que a aplicação superficial do calcário. De acordo com Bortoluzzi et al. (2014) a incorporação de calcário em solos manejados sob SPD proporciona a melhoria do desenvolvimento e da distribuição radicular da cultura da soja até a profundidade de 0,40 m refletindo em melhoria da produtividade da cultura quando comparado a aplicação superficial. Entretanto, essa alternativa de interrupção do sistema, mesmo que temporária tem resistência de ser aceita pelos produtores, devido a desestruturação física do solo, a oxidação biológica da MOS e a exposição do solo às intensas chuvas tropicais e subtropicais. A ruptura física dos macroagregados pelo preparo favorece a mineralização da MOS e compromete a continuidade dos poros. Assim, poucos eventos de chuva de elevada intensidade após a mobilização do solo, especialmente com gradagem, podem resultar em perdas de solo e de nutrientes que comprometem o esforço de anos de adoção do SPD (DALLA NORA, et al., 2014). Além disso, também deve ser contabilizado o gasto com diesel, emissão de gases de efeito estufa, consumo de tempo, mão de obra, demanda de máquinas e implementos agrícolas necessários a incorporação de corretivos. Diversos estudos têm mostrado que a aplicação de calcário em superfície sobre SPD de longa duração pode apresentar resultados semelhantes à incorporação. Estudos de longa duração sob SPD tem demonstrado 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 encontravam na camada de 0,00-0,20 m, e que 30% nas camadas do subsolo (0,20-0,60 m) independentemente se a aplicação do corretivo foi realizada na superfície ou incorporada.

Em um estudo realizado por Caires (2013), em um Latossolo no Paraná, a produção de grãos sobre SPD entre os anos de 1998 a 2003 foi semelhante, independentemente se a aplicação foi em uma única dose, parcelada em três anos ou incorporada, entretanto, o retorno econômico foi maior quando o calcário foi aplicado em superfície onde não houve o custo da incorporação.

Alternativamente a inversão de camadas do solo e a desagregação, o uso da escarificação tem se mostrado eficiente na fratura de camadas compactadas do solo, incrementando a infiltração de água (GIRARDELLO et al., 2013), porém seu efeito na incorporação de calcário é limitada e ainda não comprovada pela pesquisa. Outra forma para melhorar a fertilidade de camadas subsuperficiais do solo é a aplicação profunda de nutrientes, essa técnica baseia-se em equipamentos capazes de posicionar fertilizantes em profundidades ao redor de 0,20 m. Porém, seu efetivo efeito no incremento da produtividade de solos manejados sob SPD ainda precisa ser melhor avaliado (GIRARDELLO et al., 2013).

Uma estratégia que vem ganhando espaço é a aplicação superficial do gesso agrícola combinada ao calcário sob SPD (CAIRES, 2012; DALLA NORA et al., 2014). Essa estratégia tem avançado no Estado do RS por ser rápida e permitir a manutenção do SPD sem interrupção. A aplicação combinada do gesso e do calcário tem revelado um efeito de interação entre os produtos, com resultados superiores ao efeito isolado de cada insumo (RAIJ, 2010). Ao passo que o calcário eleva o pH, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na superfície do solo, o gesso, produto de maior solubilidade, se dissocia liberando  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (RAIJ, 2010). Com isso, há uma rápida lixiviação do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  para as camadas mais profundas do perfil, que ao se movimentar verticalmente, favorece a movimentação de cátions como é o caso do  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e em menor quantidade o  $\text{K}^+$  (RAIJ, 2010). Além disso, ocorre a formação do complexo  $\text{AlSO}_4^{2-}$  que possui menor atividade e, conseqüentemente, tem seu efeito tóxico reduzido, favorecendo o desenvolvimento radicular das culturas. Cuidados especiais no uso desta prática devem contemplar a relação Ca/Mg e a disponibilidade de micronutrientes metálicos.

## **1.2. Efeito do gesso isolado ou combinado ao calcário sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas de grãos**

Como consequência da dissolução do gesso, verifica-se uma redistribuição vertical de nutrientes no perfil do solo, elevando assim, a SB das camadas subsuperficiais (RAIJ, 2010). A

partir da elevação da concentração das bases trocáveis e o decréscimo da atividade do  $\text{Al}^{3+}$ , as camadas mais profundas do perfil passam a apresentar condições favoráveis ao aprofundamento radicular, resultando em maior aproveitamento da água armazenada no solo, com reflexo positivo na produtividade das culturas, principalmente em condições de déficit hídrico de curta duração (RITCHEY et al., 1980).

O gesso é um sal neutro, sendo assim, não são esperados efeitos diretos no aumento do pH do solo. Entretanto, a reação de troca de ligantes na superfície das partículas do solo envolvendo óxidos hidratados de Fe e  $\text{Al}^{3+}$  com o sulfato desloca o hidróxido que promove a neutralização parcial da acidez (REEVE; SUMNER, 1972). Segundo Pavan (1986), este efeito é observado com maior frequência em solos com predomínio de cargas variáveis como os Latossolos. Anteriormente, Farina e Channon (1988), Raij et al. (1994), Caires et al. (2003), Soratto e Crusciol (2008) e Marques (2008) relataram aumento do pH do solo em subsuperfície pelo efeito das doses de gesso. Quando o gesso é combinado ao calcário esse efeito é potencializado, isso porque, o incremento de cargas elétricas negativas proporcionadas pelo aumento do pH desfavorecem a adsorção do sulfato ao complexo de troca (CAMARGO; RAIJ, 1989; QUAGGIO et al., 1993, FARINA et al., 2000a).

As repostas em produtividade a partir do uso de gesso são mais frequentes em milho e trigo e com menor expressividade na soja. Esse resultado é decorrente da maior tolerância dos genótipos de soja ao  $\text{Al}^{3+}$  (CAIRES, 2012). De acordo com Sumner (1995), a cultura da soja apresenta elevada capacidade para penetrar em subsolos ácidos, quando bem suprida por molibdênio (Mo). Ainda, as poáceas apresentam raízes com CTC radicular mais baixa que as fabáceas. Para plantas como milho e trigo, a CTC radicular varia de 100 a 200 mmol (+)  $\text{kg}^{-1}$  de matéria seca de raízes, enquanto que para plantas leguminosas, tais como soja, a CTC radicular varia de 400 a 800 mmol (+)  $\text{kg}^{-1}$  de matéria seca de raízes (FERNANDES; SOUZA, 2006). As raízes com mais alta CTC tendem a acumular íons bivalentes ao contrário de raízes com mais baixa CTC que absorvem mais íons monovalentes (BROYER; STOUT, 1959). Dessa maneira, as poáceas são menos eficientes do que as fabáceas na absorção de  $\text{Ca}^{2+}$  da solução do solo. A absorção de  $\text{Ca}^{2+}$  pelas poáceas, como o milho, pode ser favorecida pelo aumento de  $\text{Ca}^{2+}$  proporcionado pela aplicação de gesso (CAIRES, 2004).

Apesar dos inúmeros estudos reportando aumento de produtividade a partir do uso do gesso, trabalhos desenvolvidos por Caires et al. (2011b) não encontraram incremento na produtividade de soja com aplicações de doses de gesso que variaram de 0,0 a 9,0  $\text{Mg ha}^{-1}$ , corroborando com resultados obtidos por Sousa e Lobato (2004); Neis et al. (2010); Rampim et al. (2011), entretanto, esses resultados foram obtidos sob condições hídricas ótimas para as

culturas em questão. Tais resultados reiteram que o efeito do gesso se restringe a determinadas situações sendo mais efetivo em Latossolos destinados a altas produtividades que apresentam elevado gradiente de redução da qualidade química das camadas mais profundas em relação às superficiais (DALLA NORA; AMADO, 2013) ou em situações de déficit hídrico (RITCHEY et al., 1982).

A utilização de doses elevadas de gesso associada a lixiviação de bases pode desfavorecer a absorção de alguns nutrientes como o  $K^+$  e  $Mg^{2+}$ , resultando no desbalanço das relações Ca/Mg, Ca/K, e K/Ca+Mg (MENGEL; KIRKBY, 1987). Ainda, quando combinado com doses altas de calcário, que elevam o pH na camada superficial, pode induzir a formação de fosfato de cálcio com reflexo na disponibilidade de P (STOUT et al., 1998; FAVARETTO et al., 2006; CAIRES et al., 2011a), fazendo com que a resposta das culturas ao gesso seja complexa e dependente de vários fatores de solo, clima, manejo e planta.



## 2. HIPÓTESES

- 1 O gesso aplicado isoladamente ou combinado ao calcário apresenta efeito residual prolongado sobre os atributos químicos do solo.
- 2 A formação de uma camada de enraizamento profunda ( $> 0,10$  m) e o aumento da produtividade em SPD exige a aplicação de calcário combinada ao gesso mesmo em condições onde ambos não seriam recomendados para o RS.
- 3 Aplicação isolada do gesso ou combinada ao calcário aumenta a eficiência no uso da precipitação da soja, milho e trigo, especialmente quando há déficit hídrico no período crítico.
- 4 A melhoria química das camadas profundas do solo propiciada pelo uso do gesso combinado ao calcário ameniza a falta de precipitação estabilizando a produtividade em condições de déficit hídrico.
- 5 O incremento do teor de cálcio em profundidade é dependente de sua saturação em superfície. Além disso, o máximo retorno econômico se dá pela aplicação de uma dose elevada de gesso mesmo quando não seria recomendado.
- 6 A melhoria dos atributos químicos em subsuperfície pela aplicação do gesso e calcário em superfície dispensa o uso de estratégias mecânicas para incorporação de corretivo no RS.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo Geral**

Avaliar o efeito do gesso aplicado isoladamente ou combinado com calcário na melhoria química da camada de enraizamento do solo comparado a métodos de manejo físicos e químicos e seu efeito no crescimento e produtividade das culturas em SPD sob situações de precipitação normal e sob déficit hídrico induzido.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- 1- Avaliar o efeito do gesso e calcário na melhoria da qualidade química da camada de enraizamento;
2. Quantificar o efeito do gesso e calcário sobre a produtividade das culturas;
3. Determinar o efeito residual do gesso nos atributos químicos do solo e na produtividade;
4. Determinar as camadas e atributos químicos que explicam o aumento da produtividade;
5. Avaliar o efeito do gesso e calcário em atenuar os efeitos de déficits hídricos;
6. Avaliar a estratégia mais adequada para aumentar a camada do solo melhorada quimicamente;
7. Avaliar o efeito dos tratamentos sob parâmetros de crescimento das culturas.



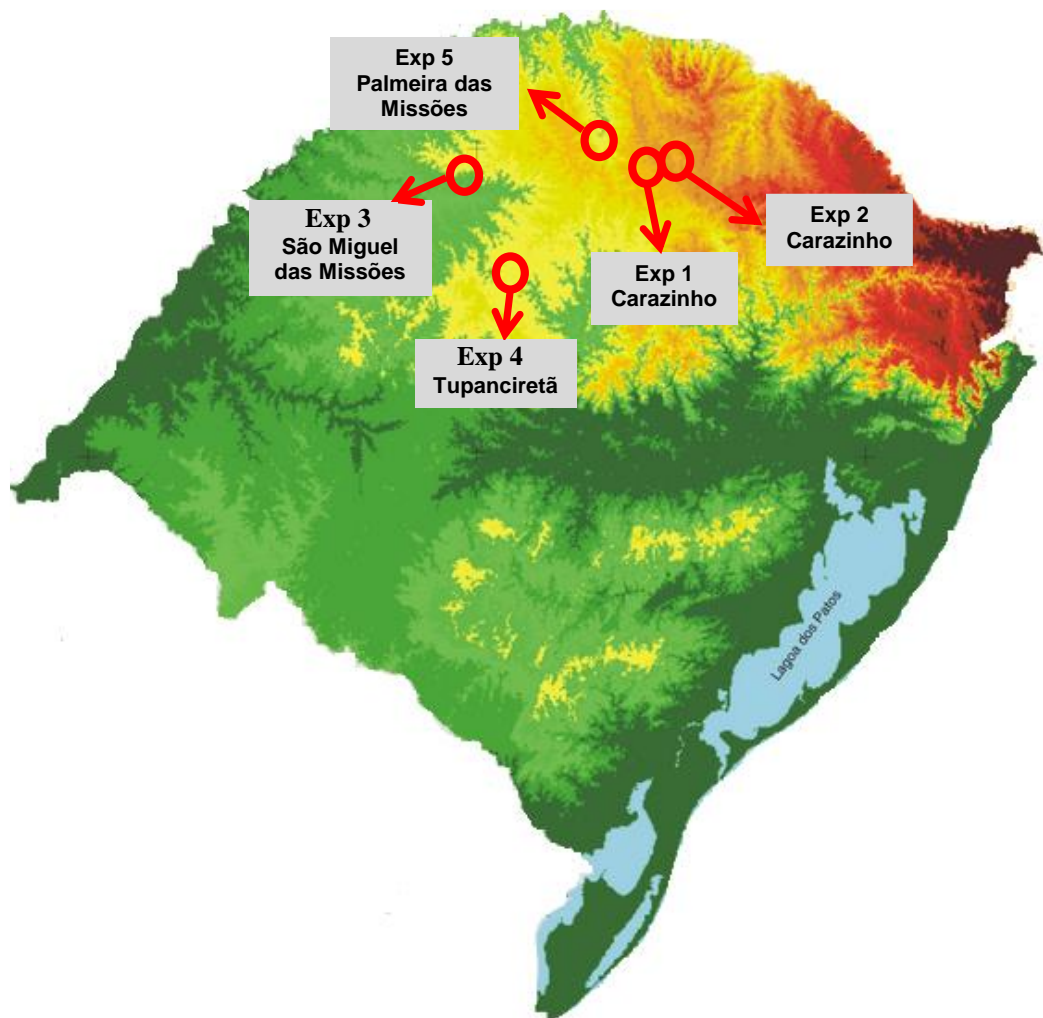


## 4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

### 4.1. Descrição das áreas de estudo

Foram conduzidos cinco experimentos em quatro Municípios do RS como representado na Figura 2. Todas as áreas investigadas estão localizadas sobre Latossolos Vermelhos distróficos com teores de argila variando de 40 a 70% na camada de 0,20-0,40 m (EMBRAPA, 2006). Segundo Köppen (1931) o clima das regiões é classificado como subtropical úmido (Cfa). As coordenadas, altitude e precipitação normal anual de cada experimento estão representadas na Tabela 1.

Figura 2 - Localização dos experimentos em seus respectivos municípios no Estado do RS.



Fonte: Dalla Nora (2017)

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

Experimento	Cidade	Coordenadas	Altitude	Precipitação anual
<b>Exp 1</b>	Carazinho	28°19'S e 52°55'O	595 m	1821 mm
<b>Exp 2</b>	Carazinho	28°17'S e 52°47'O	617 m	1821 mm
<b>Exp 3</b>	São Miguel das Missões	28°40' S e 54°23'O	265 m	1651 mm
<b>Exp 4</b>	Tupanciretã	29°00'S e 53° 94'O	507 m	1766 mm
<b>Exp 5</b>	Palmeira das Missões	27°89'S e 53°28'O	601 m	1793 mm

Fonte: Dalla Nora (2017)

As áreas experimentais têm sido manejadas sob SPD a mais de 15 anos sendo usadas comercialmente para produção de grãos, e recebendo doses próximas a  $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 75%, aplicadas espaçadamente em interstícios de 3 a 5 anos. Todas as áreas experimentais se assemelham pela sucessão de cultivos adotada, com soja e milho durante o verão e trigo ou culturas de cobertura durante o inverno, além disso, a adubação realizada vem sendo feita com o intuito de atingir elevadas produtividades.

A caracterização química inicial das áreas experimentais foi realizada anteriormente a 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 analisados conforme metodologias descritas por Tedesco et al. (1995). O solo coletado posteriormente a aplicação dos tratamentos 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.

Tabela 2 - Atributos químicos avaliados anteriormente a implantação dos tratamentos nas áreas experimentais.

Prof.(m)	pH	Al	Ca	Mg	K	Ca/Mg	CTC	H+Al	P	S	SB	Sat. Al	Argila
	H <sub>2</sub> O												
-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						--mg dm <sup>-3</sup> --			-----%-----		-g Kg <sup>-1</sup>		
<b>Exp 1 (Carazinho)</b>													
0,00-0,05	5,6	0,0	6,7	3,5	0,18	1,9	15,6	5,2	28,3	8,6	68,2	0	530
0,05-0,10	5,6	0,0	6,1	3,5	0,13	1,7	14,9	5,2	10,1	17,3	67,6	0	600
0,10-0,15	5,4	0,2	5,4	3,2	0,07	1,7	14,8	6,1	5,0	12,9	59,9	1,8	670
0,15-0,25	5,2	0,4	4,3	3,0	0,05	1,4	15,2	7,8	2,6	10,8	49,5	4,6	680
0,25-0,40	4,9	0,8	2,5	2,6	0,04	1,0	15,6	10,5	1,1	14,0	34,8	16,1	700
0,40-0,60	4,5	0,9	2,1	2,3	0,03	0,9	15,3	10,9	0,8	15,1	30,9	23,9	740
<b>Exp 2 (Carazinho)</b>													
0,00-0,05	5,9	0	4,9	2,2	0,40	2,2	11,6	4,1	62,8	16,9	65,6	0	240
0,05-0,10	5,7	0	4,2	2,0	0,36	2,1	10,3	3,7	27,0	14,5	64,9	0	320
0,10-0,15	5,7	0	3,3	2,0	0,35	1,6	9,7	4,0	16,6	10,4	59,1	0	370
0,15-0,25	5,4	0,2	2,6	1,8	0,33	1,4	9,4	4,7	4,07	8,05	51,4	0,3	460
0,25-0,40	5,1	0,4	2,5	1,3	0,25	1,9	11,4	7,3	2,40	9,6	37,8	8,1	500
0,40-0,60	4,8	1,2	1,8	0,7	0,17	2,5	12,2	9,5	0,97	7,2	22,3	30,9	520
<b>Exp 3* (São Miguel das Missões)</b>													
0,00-0,05	5,0	0,5	4,5	2,8	0,46	2,0	16,2	8,4	29,2	4,9	54,4	5,6	420
0,05-0,10	4,6	1,2	3,1	3,1	0,23	1,0	13,4	6,9	6,8	2,3	43,1	15,3	600
0,10-0,15	4,3	1,8	1,9	1,2	0,15	0,9	14,8	11,5	3,6	1,1	27,7	29,9	650
0,15-0,25	4,2	2,5	1,5	1,7	0,09	0,9	13,2	9,9	2,4	6,2	21,0	42,3	770
0,25-0,40	4,2	2,4	1,4	1,6	0,06	0,9	11,6	8,5	1,6	4,7	23,3	43,2	750
0,40-0,60	4,2	2,1	1,2	1,4	0,06	0,8	11,5	8,8	1,8	1,6	23,8	43,3	650
<b>Exp 4 (Tupanciretã)</b>													
0,00-0,05	6,2	0,0	6,5	3,5	0,37	1,9	12,5	2,1	14,7	5,2	82,2	0,0	295,0
0,05-0,10	6,1	0,0	4,7	2,3	0,23	2,0	10,5	3,3	12,7	5,2	68,4	0,0	335,0
0,10-0,15	5,0	0,5	2,3	2,2	0,15	1,1	12,5	7,8	10,7	4,2	37,0	9,9	400,0
0,15-0,25	4,7	1,3	1,7	1,8	0,11	0,9	13,0	9,4	4,0	2,4	28,0	25,7	440,0
0,25-0,40	4,4	2,9	1,4	1,1	0,10	1,2	20,0	17,4	2,3	5,7	13,4	52,6	500,0
0,40-0,60	4,2	4,3	1,1	0,5	0,08	1,1	22,3	20,6	0,9	12,1	9,6	66,9	610,0
<b>Exp 5# (Palmeira das Missões)</b>													
0,00-0,05	5,3	0,1	4,5	1,8	0,66	1,9	13,5	6,5	25,2	14,9	51,5	1,4	390
0,05-0,10	5,1	0,9	3,1	1,1	0,43	2,8	11,4	6,8	16,8	12,3	40,6	16,2	400
0,10-0,15	4,9	1,2	1,9	1,2	0,25	1,6	10,8	7,4	9,6	10,1	32,0	26,4	550
0,15-0,25	4,7	1,5	1,5	1,7	0,29	1,5	10,2	6,7	7,4	6,2	31,0	30,1	570
0,25-0,40	4,5	1,8	1,4	1,6	0,16	0,9	11,6	8,4	4,6	4,7	33,3	36,2	600
0,40-0,60	4,5	1,9	1,2	1,4	0,16	0,8	11,5	8,7	1,8	1,6	23,8	40,7	650

Fonte: Dalla Nora (2017); Al- Alumino, Ca- Cálcio, Mg- Magnésio, K- Potássio, Ca/Mg- Relação Ca/Mg, CTC<sub>pH7,0</sub>- Capacidade de troca de cátions a pH 7,0, P- Fósforo, S- Enxofre, V%- Saturação por bases, m%- Saturação por Al. \*Em conjunto ao Exp 4 foi realizado o Artigo IV, o qual compreende a realização da exclusão da precipitação. # Em conjunto ao Exp 5 foi realizado o Artigo VI que compreende a realização da comparação da aplicação de doses elevadas de gesso e calcário com a aplicação parcelada e a incorporação.

#### 4.1.1. Descrição dos experimentos de longa duração

Os experimentos aqui descritos foram previamente implantados no ano de 2009, completando 80 meses em março de 2016 quando foram encerrados os experimentos.

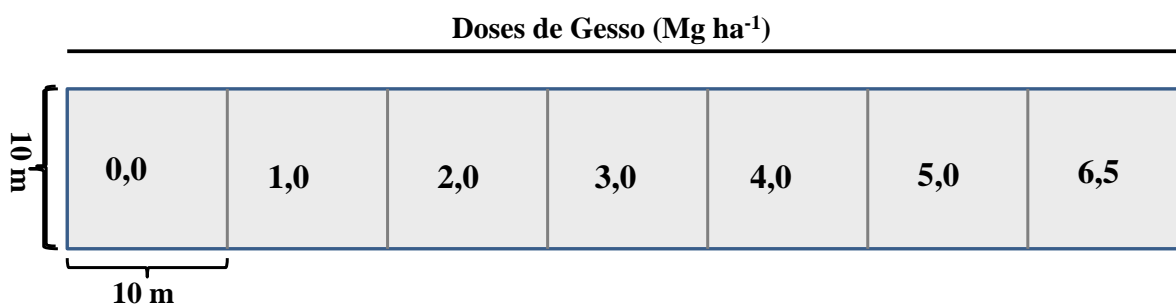
#### 4.1.1.1. Experimento 1 (Exp 1):

O experimento denominado como Exp 1 foi instalado na cidade de Carazinho no mês de agosto de 2009. Os tratamentos foram aplicados sobre a cultura da aveia preta, a qual foi dessecada e posteriormente foi implantada a cultura do milho. A sucessão de culturas do experimento foi a seguinte: cultura do trigo em julho de 2010; cultura da soja no mês de dezembro de 2010; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2011; cultura da soja semeada no mês de novembro de 2011; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2012 sucedida pela cultura do milho semeada no mês de setembro de 2012; cultura da aveia preta no inverno de 2013 seguido pela cultura da soja semeada no mês de abril de 2014; cultura da aveia preta durante o inverno e no mês de novembro de 2014 foi semeada a cultura da soja; cultura da aveia-preta como cobertura no inverno de 2015; cultura do milho semeada em setembro de 2015 e colhida em janeiro de 2016 encerrando o período de avaliações do experimento.

Após 10 meses da aplicação dos tratamentos foi realizada a primeira amostragem de solo. Posteriormente, foram coletadas amostras de solo 22 meses (abril de 2011), 32 meses (janeiro de 2012), 45 meses (abril de 2013), 56 meses (abril de 2014) e 72 meses (agosto de 2015) após implantação do experimento. A coleta de solo realizada aos 72 meses foi a última realizada no experimento

O experimento foi implantado em um delineamento em blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram constituídos das seguintes doses de gesso: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,5 Mg ha<sup>-1</sup>, aplicados a lanço (Figura 3).

Figura 3 - Croqui do desenho experimental de um bloco do Exp 1.



Fonte: Dalla Nora (2017)

#### 4.1.1.2. *Experimento 2 (Exp 2):*

O experimento denominado como Exp 2 também foi instalado na cidade de Carazinho no mês de agosto de 2009. Os tratamentos foram aplicados sobre a cultura da aveia preta, a qual foi dessecada e posteriormente foi implantada a cultura da soja. Na sucessão foram implantadas as seguintes culturas: aveia preta consorciada com nabo forrageiro em julho de 2010; cultura do milho no mês de setembro de 2010; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2011; cultura da soja semeada no mês de novembro de 2011; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2012; cultura da soja semeada no mês de setembro de 2012; cultura do trigo no inverno de 2013; cultura da soja no mês de novembro de 2013; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2014; cultura da soja em setembro de 2014; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2015 e por fim, cultura da soja em novembro de 2015 e colhida em março de 2016, encerrando o experimento.

As profundidades de amostragem e a época da realização das coletas de solo do Exp 2 seguiram o cronograma das coletas do Exp 1.

O delineamento experimental, bem como os tratamentos adotados no Exp 2 foram iguais aos do Exp 1 (Figura 3).

#### 4.1.2. Descrição dos experimentos de média duração

Os experimentos aqui descritos foram previamente implantados no ano de 2011, completando 54 meses de aplicação dos tratamentos em abril de 2016 quando foram encerrados os experimentos.

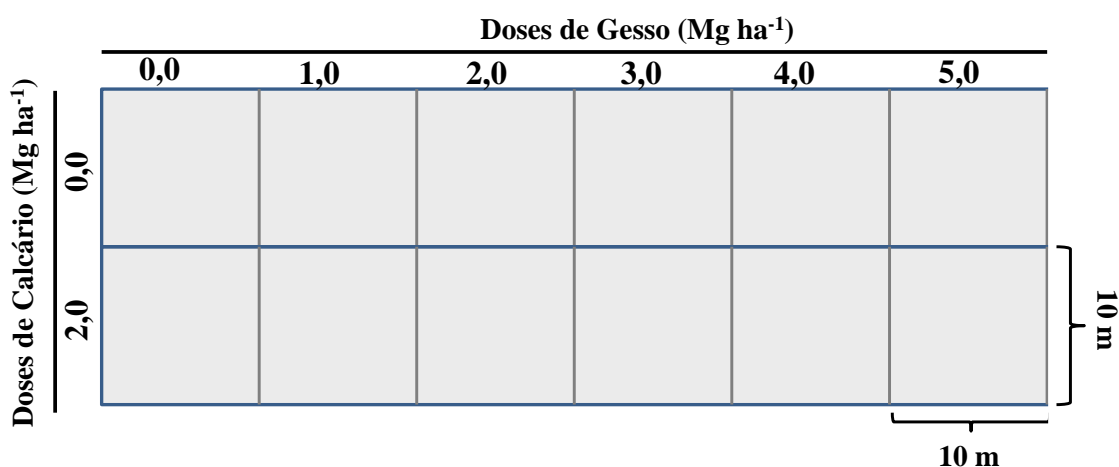
##### 4.1.2.1. *Experimento 3 (Exp 3):*

O experimento denominado Exp 3 foi implantado na cidade de São Miguel das Missões no mês de setembro de 2011 anteriormente a cultura da soja. Na sucessão de culturas foram implantados os seguintes cultivos: cultura do trigo durante o inverno de 2012; cultura da soja semeada em novembro de 2012; cultura do trigo durante o inverno de 2013; cultura da soja em novembro de 2013; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2014; cultura da soja em novembro de 2014; cultura do centeio como cobertura no inverno de 2015 e, por fim, cultura do milho em setembro de 2015 e colhido em fevereiro de 2016 quando foi encerrado o experimento.

As amostragens de solo foram realizadas 12 meses após a implantação do experimento em setembro de 2012, após 30 meses em março de 2014 e após 54 meses em dezembro de 2015.

O Exp 3 foi composto por um delineamento de blocos ao acaso com parcela subdividida em que as parcelas principais foram formadas pelas seguintes doses de gesso: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>. As sub-parcelas foram formadas pelas doses de 0,0 e 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário aplicadas em março de 2013 e reaplicadas em março de 2015 (Figura 4).

Figura 4 - Croqui do desenho experimental de um bloco do Exp 3.



Fonte: Dalla Nora (2017)

No Exp 3, para as safras de 2014/15 e 2015/16, foi incluída uma terceira variável independente, a restrição da precipitação, pela subdivisão das parcelas. A descrição da inclusão da restrição da precipitação foi feita com maiores detalhes no Artigo IV (ITEM 8).

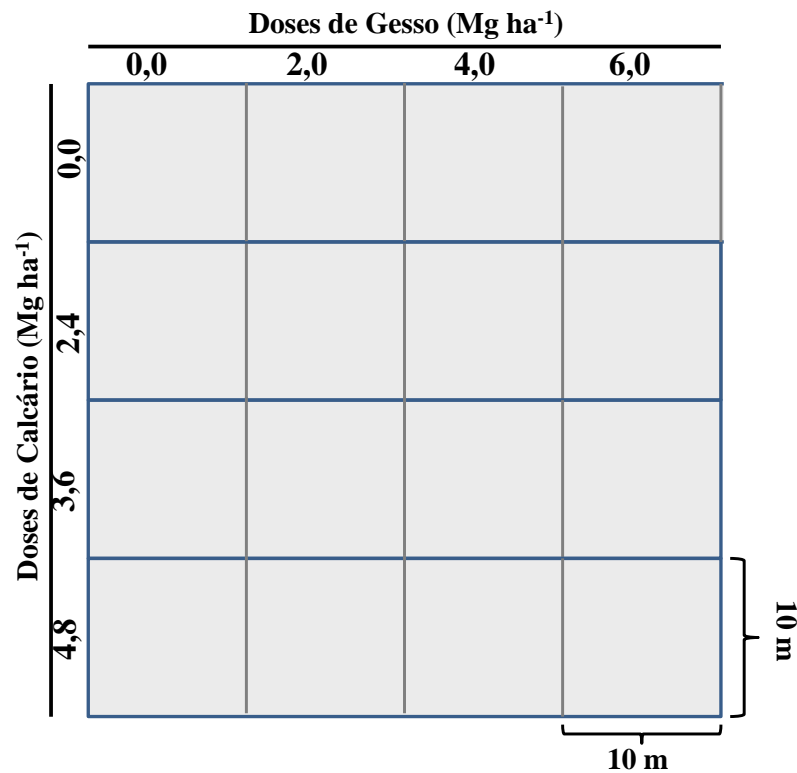
#### 4.1.2.2. Experimento 4 (Exp 4):

O experimento denominado Exp 4 foi implantado na cidade de Tupanciretã no mês de setembro de 2011 anteriormente a cultura da soja. Na sucessão de culturas foram implantados os seguintes cultivos: cultura do trigo no inverno de 2012; cultura da soja implantada em novembro de 2012; cultura do trigo no inverno de 2013; cultura da soja semeada em novembro de 2013; cultura do trigo no inverno de 2014; cultura da soja em novembro de 2014; cultura da aveia no inverno de 2015 e, por fim cultura da soja semeada no mês de novembro de 2015 e colhida em março de 2016 quando foi encerrado o experimento.

As amostragens de solo foram realizadas 12 meses após a implantação do experimento em outubro de 2012, após 30 meses em março de 2014 e após 50 meses em dezembro de 2015.

As parcelas desse experimento foram compostas por um delineamento de blocos ao acaso com parcela subdividida em que as parcelas principais foram formadas pelas seguintes doses de gesso: 0,0; 2,0; 4,0 e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>. As sub-parcelas foram formadas pelas doses de 0,0; 2,4; 3,6 e 4,8 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 5). O gesso e o calcário foram aplicados a lanço nas parcelas experimentais.

Figura 5 - Croqui do desenho experimental de um bloco do Exp 4.



Fonte: Dalla Nora (2017)

#### 4.1.3. Descrição do experimento recentemente implantado

O experimento aqui descrito foi implantado em agosto de 2013, completando 30 meses de aplicação dos tratamentos em abril de 2016.

##### 4.1.3.1. Experimento 5 (Exp 5):

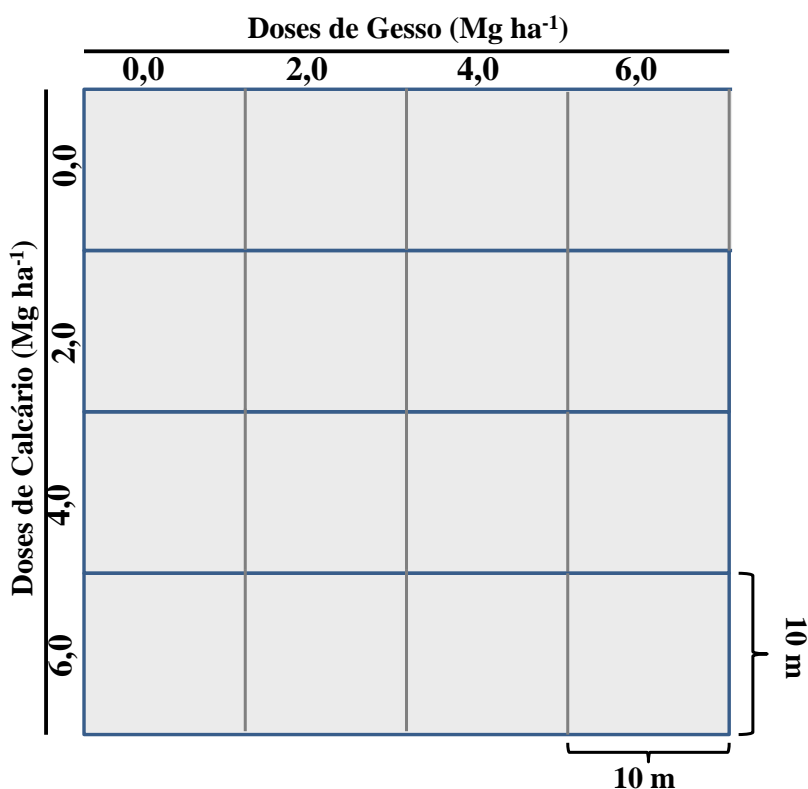
O experimento denominado Exp 5 foi implantado na cidade de Palmeira das Missões no mês de julho de 2013 sobre a cultura do trigo. Na sucessão de culturas foram implantados os seguintes cultivos: cultura da soja no mês de novembro de 2013; cultura da aveia como

cobertura no inverno de 2014; cultura da soja semeada em novembro de 2014; cultura do trigo no inverno de 2015 e por fim, cultura da soja em novembro de 2015 e colhida em março de 2016 quando foi encerrado o experimento.

A primeira amostragem de solo foi realizada 12 meses após a implantação do experimento em julho de 2014 e a segunda aos 35 meses em junho de 2016.

As parcelas desse experimento foram compostas por um delineamento de blocos ao acaso com parcela subdividida em que as parcelas principais foram formadas pelas seguintes doses de gesso: 0,0; 2,0; 4,0 e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>. As sub-parcelas foram formadas pelas doses de 0,0; 2,0; 4,0 e; 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 6). O gesso e o calcário foram aplicados a lanço nas parcelas experimentais.

Figura 6 - Croqui do desenho experimental de um bloco do Exp 5.



Fonte: Dalla Nora (2017)

Em agosto de 2015 alguns tratamentos foram incluídos no experimento como a aplicação de corretivos em linha, reaplicação de calcário e gesso e, ainda, foi realizada a incorporação do calcário. Maiores detalhes desse experimento foram descritos no Artigo VI (ITEM 10).



#### 4.1.4. Definição dos tratamentos

As doses de gesso médias para cada experimento foram tomadas como dose de referência, sendo determinadas de acordo com o teor de argila na camada de 0,20-0,40 m, seguindo a equação (1) (QUAGGIO; RAIJ, 1996), onde:  $NG = \text{argila} \times 6,0$ .

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

$NG$  = necessidade de gesso em  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $\text{Argila}$  = teor de argila no solo  $\text{g kg}^{-1}$ .

As demais doses de gesso foram determinadas como valores acima e abaixo da dose de referência, com o intuito de ajustar uma dose ideal para as condições de cada experimento.

A dose média de calcário foi estabelecida com o objetivo de atingir 65% de SB na camada de 0,00-0,20 m.

A equação (1) é recomendada para situações em que os valores críticos de  $\text{Ca}^{2+} < 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e saturação por  $\text{Al}^{3+} > 20,0 \%$  na camada de 0,20-0,40 m (SOUSA; LOBATO, 2002). Nesse sentido, de acordo com a caracterização inicial das áreas experimentais (Tabela 2), os experimentos Exp 3, 4 e 5 apontariam como viável a aplicação de gesso apenas pelo índice saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , os demais experimentos não apontavam a necessidade do gesso. Entretanto, resultados obtidos em pesquisas realizadas em Latossolos do Paraná (PR) e RS (CAIRES et al., 2003; 2008; 2011a,b; CAIRES, 2012; DALLA NORA et al 2013; DALLA NORA; AMADO, 2013) apontam aumentos de produtividade pelo uso do gesso, sugerindo que os parâmetros analisados para aplicação de gesso no RS podem ser outros.

O gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) utilizado nos experimentos continha em sua formulação química 21,0% de Ca, 15,5% de enxofre, 0,0024% de flúor e 0,9% de P e, em suas características físicas apresentava densidade de  $1,17 \text{ g cm}^{-3}$  e 6,5% de umidade relativa. O calcário dolomítico utilizado continha em sua formulação 29,5% de CaO, 19,5% de MgO e PRNT de 75%.

#### 4.1.5. Descrição das principais avaliações realizadas

Para as amostras de solo foram realizadas as análises de pH  $\text{H}_2\text{O}$  determinado por potenciômetro na suspensão solo-água na proporção de 1:1, teor de  $\text{Al}^{3+}$  obtido na extração com KCL  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e titulado com NaOH  $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  obtidos na extração com KCL  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, P e  $\text{K}^+$  no solo

extraídos pelo método do extrator duplo ácido Mehlich-I e determinados por espectroscopia colorimétrica e fotometria de chama, respectivamente. A determinação do teor de  $S-SO_4^{2-}$  foi realizada a partir da extração com fosfato de  $Ca^{2+}$  e o sulfato mineral sendo determinado após a precipitação com solução de gelatina -  $BaCl_2$  (TABATABAI; BREMNER, 1970). As metodologias realizadas estão descritas em Tedesco et al. (1995).

No período do florescimento das culturas agrícolas implantadas em todos os experimentos foi realizada a coleta de tecido foliar para realização das análises químicas de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre de acordo com metodologias descritas em Tedesco et al. (1995).

Na maturação fisiológica das culturas agrícolas, 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 plantio), e a massa de grãos corrigida para umidade de 13%.

A partir dos cultivos agrícolas implantadas no verão de 2013, foi realizada a medição do índice de área foliar (IAF) e determinação do índice de vegetação (IV) chamado de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

O IAF foi medido com ajuda do sensor LAI (LAI-2200, Plant Canopy Analyzer), esse equipamento é um sensor de reflectância que determina a área recoberta por plantas a partir da diferença entre a luz do ambiente que incide sobre o dossel das plantas pela luz que atinge a superfície do solo. Diversos estudos apontam o IAF como uma ferramenta importante para prever a capacidade de fotossíntese e crescimento da planta, além disso, esse índice pode ser medido com ajuda de sensores (XUE et al., 2004; EL-SHIKHA et al., 2007).

A determinação do NDVI foi realizada com auxílio do sensor Green Seeker (Trimble, Sunnyvale, Califórnia, EUA). O NDVI corresponde a características espectrais correspondentes a vegetação da planta considerando fatores como IAF e biomassa.

#### 4.1.6. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, e em caso de significância estatística ( $p < 0,05$ ) foram realizados procedimentos estatísticos necessários para cada Artigo. Os procedimentos estão descritos com maiores detalhes em cada estudo realizado.

## 5. ARTIGO I - ALLEVIATE THE GRADIENT OF CHEMICAL ATTRIBUTES IN ROOTING ZONE OF DYSTROPHIC OXISOLS BY GYPSUM AND LIME INPUTS UNDER NO-TILL\*

**\*Artigo formatado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo**

### 5.1. ABSTRACT

Frequently, the improvement of soil chemical attributes in dystrophic Oxisols managed under long-term no-tillage system (NTS) with surface broadcast lime had been restricted to a shallow topsoil layer. As a consequence, frequently an abrupt chemical quality gradient is created with deterioration from surface towards deeper layers in Oxisols of Rio Grande do Sul State. This study aimed to assess the temporal effects of gypsum, applied singly or in combination with lime, on the  $\text{Ca}^{+2}$  content and  $\text{Al}^{+3}$  saturation in the rooting zone (RZ) (0.00-0.40 m). A group of four experiments were conducted from 2009 to 2014 in Typic Hapludoxs with distinct chemical qualities in RZ, managed under long-term NTS (over 20 years) in the Rio Grande do Sul (subtropical region). The experimental design used was the randomized blocks with three replications. The experiments I and II were implemented in 2009, with treatments composed of gypsum rates ranging from 0.0 to 6.5  $\text{Mg ha}^{-1}$ . The other two experiments were implemented in 2011. In the experiment III, a split-plot design was used, with plots composed by gypsum rates ranging from 0.0 to 5.0  $\text{Mg ha}^{-1}$ , and the subplots with two lime rates (0.0 and 2.0  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). In the experiment IV a split-plot design was also used, with plots composed by gypsum rates ranging from 0.0 to 6.0  $\text{Mg ha}^{-1}$  and subplots by four lime rates ranging from 0.0 to 4.8  $\text{Mg ha}^{-1}$ . The soil samplings were stratified in layers at depth of 0.00 to 0.60 m and performed temporarily throughout the experimental period. The use of gypsum presented an increase, proportional to the rate, to the  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{S-SO}_4^{2-}$  contents and a decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation in the whole soil profile evaluated. However, an increase in the base saturation (BS) of subsoil (layer of 0.25-0.60 m) was only observed at high rates of gypsum (> 5.0  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) and after medium term when a high volume of precipitation was accumulate. A faster and more pronounced effect of subsoil amelioration was noted when the chemical quality of the topsoil layer was already high and when gypsum was combined with lime input. The higher improvement in subsoil chemical quality induced by gypsum, singly or combined with lime, was found in a period exceeding 30 months (Experiments III and IV) and remaining for up to 54 months (Experiments I and II). The combination of gypsum with lime was an effective

strategy to enhance the vertical movement of bases in RZ mitigating the chemical quality gradient in dystrophic Oxisol, avoiding NTS discontinuity.

**Keywords: calcium, base saturation, Al saturation, subsoil.**

## 5.2. RESUMO:

### *MITIGAÇÃO DO GRADIENTE DE ATRIBUTOS QUÍMICOS NA ZONA DE ENRAIZAMENTO DE LATOSSOLOS Distrófico PELA APICAÇÃO DE GESSO E CALCÁRIO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO*

*A melhoria dos atributos químicos do solo em Latossolos distrófico manejados sob sistema de plantio direto (SPD) com aplicação superficial de calcário têm sido geralmente limitada a camada superficial. Com isso, frequentemente é reportado em Latossolos do Estado do Rio Grande do Sul um gradiente de qualidade química abrupto com deterioração da superfície para as camadas mais profundas. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito temporal do gesso, aplicado isoladamente ou em combinação com calcário, nos teores de  $\text{Ca}^{+2}$  e na saturação por  $\text{Al}^{+3}$  da zona de enraizamento (ZE) (0,00-0,40 m). Quatro experimentos foram conduzidos entre 2009 e 2014 em Latossolos distróficos com qualidades químicas distintas, manejados sob SPD de longo duração (mais de 20 anos) no Rio Grande do Sul (região subtropical). O delineamento experimental foi de blocos casualizados com três repetições. Os experimentos I e II foram implantados em 2009, com tratamentos constituídos por doses de gesso variando entre 0,0 e 6,5  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Os outros dois experimentos foram implantados em 2011. O experimento III foi composto por parcelas subdivididas, as parcelas receberam doses de gesso entre 0,0 e 5,0  $\text{Mg ha}^{-1}$ , e as subparcelas pela aplicação de duas doses de calcário (0 e 2,0  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). No experimento IV também foi usado um esquema de parcelas subdivididas, com parcelas compostas por doses de gesso variando de 0,0 a 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  e subparcelas com quatro doses de calcário que variaram entre 0,0 a 4,8  $\text{Mg ha}^{-1}$ . As amostras de solo foram estratificados na profundidade de 0,00 a 0,60 m e executada temporalmente durante o período experimental. O uso do gesso incrementou, proporcional a dose, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  e decresceu a saturação por  $\text{Al}^{3+}$  na zona de enraizamento (ZE). No entanto, foi observado aumento na saturação por bases (SB) do subsolo (camada de 0,25-0,60 m) apenas no tratamento com doses elevadas de gesso ( $> 5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e após um tempo médio de tempo após a aplicação, com um acúmulo de elevado volume de precipitação. Um efeito rápido e mais*

*pronunciado na melhoria do subsolo foi observado quando a qualidade química da camada superficial já era elevada e quando o gesso foi combinado com o calcário. O maior efeito de melhoria da qualidade química do subsolo induzida pelo gesso foi reportado em um período superior a 30 meses (Experimentos III e IV) persistindo por até 54 meses (Experimentos I e II). A combinação de gesso com calcário foi uma estratégia eficaz para deslocar verticalmente bases no perfil do solo atenuando o gradiente de qualidade química na ZE de Latossolos, dispensando a interrupção do SPD.*

*Palavras-chave: cálcio, saturação por bases, saturação por Al, gesso, calcário, subsolo.*

### **5.3. INTRODUCTION**

The no-tillage system (NTS) associated with cover crop and crop rotation has been reported as one of the best alternatives for agricultural soil management in South Brazil (Debarba and Amado, 1997). The saving of time, fuel and labor at crop establishment under NTS support a rapidly adoption of this conservation system in Paraná (PR) and Rio Grande do Sul (RS) States throughout the 1990s, reaching today around 80 % of cropland of these states (Febrapdp, 2012).

However, several studies have reported that soil chemical improvements in long-term NTS are often restricted to the shallow top layers (Blanco-Canqui and Lal, 2008), creating in dystrophic Oxisols (Typic Hapludox) an unfavorable profile for root system deepening (Caires et al., 2011a; Bortoluzzi et al., 2014). As a consequence, there is an increase in drought risk and yield instability (Dalla Nora and Amado, 2013). The RS stands out among the Brazilian states that in the last two decades had the highest losses in agricultural production due to short-term water stress (Leivas et al., 2014) emphasizing the importance of developing and mitigation strategies to drought stress in NTS.

Experiments carried out under NTS in Southern Brazil during the 1980s and 1990s in previously limed soils managed under conventional tillage, presented limited response to lime rates and application modes (surface or incorporate) (Manual..., 1981; Pöttker and Ben, 1998). Furthermore, the gypsum, applied singly or combined with lime, generally was also not been supported by the research conducted during that period (Ernani, 1986; Peruzzo et al., 1990). Therefore, the liming recommendation under NTS in RS was set up for the correction of the layer 0.00-0.10 m, which has been considered as the acidity diagnosis layer. In addition, values of up to 10 % of  $Al^{3+}$  saturation in the diagnosis layer could be acceptable, since the  $Al^{3+}$  has

lower activity due its complexation with the soil organic matter (SOM) under NTS (Miyazawa et al., 2002). Generally, the lime rates under NTS were reduced for considering a shallow diagnostic layer (0.00 to 0.10 m) in relation to previously used in conventional tillage (full rate and 0.00-0.20 m as diagnostic layer) and for assuming a certain tolerance of soybean and corn to the presence of  $Al^{3+}$  (CQFS-RS/SC, 2004).

Amelioration of the chemical quality of subsurface layers in Oxisols under continuous NTS is improbable under low rates of lime and spaced for a long period of time (Bortoluzzi et al., 2014) In addition, the mono-cropping soybean and higher grain yields achieved in recent years, resulting in higher nutrients exportation (Medeiros et al., 2008). As a consequence, an abrupt chemical quality gradient between the surface and subsurface layers in rooting zone (RZ) has frequently been reported in southern Brazil (Dalla Nora and Amado, 2013; Zandoná et al., 2015). This gradient is characterized by an increase in  $Al^{3+}$  content and decrease in  $Ca^{2+}$  saturation in subsurface layers, and frequently cause a chemical restriction to plant root deepening compromising the efficient use of soil water (Pauletti et al., 2014; Zandoná et al., 2015). Farmers and technical consultants have searching alternatives for ameliorate the subsoil layers in order to create a thicker layer (0.00-0.40 m) with high chemical quality under continuous NTS. Caires et al. (2008) evaluating the amelioration of subsoil chemical quality, noted that the surface broadcast lime was efficient in acidity reduction of subsoil layers only at high rates, with frequent reapplications and after medium/long term. The use of gypsum has been recognized as an efficient alternative for chemical improvement of the soil subsurface layers, particularly when combined with lime, since a synergistic effect between these inputs has been reported (Raij, 2010; Dalla Nora et al., 2014).

More recently, researches carried out since the 2000s under mature NTS by Caires et al. (2005; 2008); Dalla Nora and Amado (2013); Pauletti et al. (2014) and Zandoná et al. (2015) have reported chemical improvement of the RZ by applying gypsum, singly or in combination with lime (Soratto and Crusciol, 2008; Crusciol et al., 2016), increasing  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  contents and decreasing the  $Al^{3+}$  activity in the Oxisol's subsoil in NTS.

The State of RS has a NTS area of about 5 million ha, most in Oxisols, however, there is scarce information on the strategies for the improvement of chemical quality in subsoil layers. Because of agricultural importance of the RS State, second largest Brazilian soybean area, there is a need of developing site-specific fertilizer and liming recommendation. Therefore, studies with gypsum input carried out in States of Paraná, São Paulo (SP) or from the Cerrado regions should be carefully extrapolated to the RS. This study tests the hypothesis that the applications combined of gypsum and dolomitic lime, or gypsum singly improve the subsoil chemical

quality under continuous NTS. The main objective of this study was to assess the temporal effects of gypsum, applied singly or in combination with lime, on the increase in  $\text{Ca}^{2+}$  content and decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation mitigating the gradient of chemical quality in the RZ (defined in the present study as the layer from 0.00 to 0.40 m) under long-term NTS in Typic Hapludox.

## 5.4. MATERIALS AND METHODS

### 5.4.1. Description of the experimental areas

Four experiments were conducted in three main small grain crops municipalities in RS (Table 1). In all experiments, the soil was classified as a Typic Hapludox (Soil Survey Staff; 2010) with loamy to clayey texture (Embrapa, 2006). The region climate is classified as humid subtropical (Cfa) (Köppen, 1931). Air temperature data and annual average precipitation are shown in Table 1. The precipitation during the experimental period was recorded by an experimental station nearby the experimental sites (Figure 1). The experimental areas have been managed under continuous NTS for at least 15 years before the experiments implementation with inputs of  $2.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of lime with 80% effective  $\text{CaCO}_3$  equivalent applied with 4 years interval. The experiments were implemented when the croplands had black oat (*Avena strigosa Schreb*) winter cover crop, which was chemically managed with glyphosate [N-(phosphonomethyl) glycine]. Two experiments had gypsum applied in single input and two other had gypsum in combination with lime. The experiments I and II had the gypsum rates applied in August 2009. The experiment III had the gypsum applied in August 2011 and the lime in April 2013. The experiment IV had the gypsum and lime applied simultaneously. All experimental areas had the inputs broadcast on the soil surface. The sequence of crops, the fertilizer inputs and the grain yield evaluation period are presented in Table 2.

The hybrids and cultivars used in this study were: Pioneer 3069 in experiments I and II, and Dekalb 240 in experiments 3 and 4 for maize; Nidera 5909 in experiments I and II, and 235RR Coodetec in experiments 3 and 4 for soybean; Quartz in Experiments I and II, and BRS Tarumã in experiments 3 and 4 for wheat. The soybean cultivars and maize hybrids used in the experiments were transgenic, with characteristics of short-cycle and high yield potential. These genetic materials are nowadays the most widely cropped in the RS. The maize was sown at density of  $4 \text{ seeds m}^{-1}$  with rows spaced 0.50 m apart, the soybean at  $12 \text{ seeds m}^{-1}$  (inoculated with *Bradyrhizobium japonicum*) with rows spaced 0.50 m apart, and the wheat at  $60 \text{ seeds m}^{-1}$  with rows spaced 0.20 m apart.

The soil chemical characterization was performed prior to the implementation of the experiments, randomly collecting five sub-samples in each experimental area at depths: from 0.00 to 0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15; 0.15-0.25; 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m. The Table 3 presents the chemical attributes of the first characterization of the experimental areas.

#### 5.4.2. Experimental design

The randomized block design with three replications was used in all experiments, with temporal assessments of the soil chemical attributes. Each plot had area of 64 m<sup>2</sup> (8.0 × 8.0 m). The treatments assessed in experiments I and II consisted of gypsum rates of 0.0; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0 and 6.5 Mg ha<sup>-1</sup>, applied in August 2009. In the experiment III, a split-plot design was used, with plots composed by gypsum rates of 0.0; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>, applied in August 2011. Two years before a lime application of 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> occurred in this site. After 22 months (April 2013) of the experiment begin, the main treatments were subdivided and the subplots were composed by dolomitic lime rates of 0.0 and 2.0 Mg ha<sup>-1</sup>. In the experiment IV, a split-plot design was used, with plots composed by gypsum rates of 0.0; 2.0; 4.0 and 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> the subplots ranging of 0.0; 2.4; 3.6 to 4.8 Mg ha<sup>-1</sup> of lime, applied simultaneously in August 2011. The central lime rate (3.6 Mg ha<sup>-1</sup>) was set up in order to achieve 70 % of BS in the layer of 0.00-0.20 m. A central gypsum rate was set up according the Equation 1 reported by Quaggio and Raij (1996). The Equation 1 has been recommended for the application of gypsum in soils of Cerrado region and Central Brazil.

$$GR = \text{clay content} \times 60$$

Equation 1

where GR is the gypsum rate (kg ha<sup>-1</sup>) and clay content (g kg<sup>-1</sup>) in the 0.20-0.40 m soil layer.

The agricultural gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) used in the experiments consisted of 210.0 g kg<sup>-1</sup> of Ca<sup>2+</sup>, 155.0 g kg<sup>-1</sup> of S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 0.024 g kg<sup>-1</sup> of F<sup>-</sup> and 9.0 g kg<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. The dolomitic lime consisted of 30 % of CaO and 20 % of MgO, with total relative neutralizing power of 75 % and reactivity of 85 %.

#### 5.4.3. Sampling and main assessments

Soil sampling in the experiments I and II were performed 6, 14 (only in experiment I), 22, 32, 44 and 56 months after treatments application. Soil sampling in the experiments III and IV were performed 15 and 30 months after application. Soil sampling in the experiment III were performed 30 months after gypsum application and eight months after the lime subplot set up.



The soil was sampled with three replicates to form a composite sample for each of the following depths: 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15; 0.15-0.25; 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m, manually opening trenches with dimensions of  $0.3 \times 0.3 \times 0.6$  m. The soil samples were collected with a spatula at the front wall of the trench, it was dried in a forced-air oven and had the roots and plant residues present removed.

The chemical attributes were analyzed according to the methods described in Tedesco et al. (1995). The chemical evaluations were  $\text{Al}^{3+}$  content extracted with  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$  and titrated with  $\text{NaOH } 0.0125 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  content extracted with  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$  and determined by atomic absorption spectrophotometry. The  $\text{S-SO}_4^{2-}$  was extracted by  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  (500 mg  $\text{L}^{-1}$  of P) and determined by turbidimetry (Beaton et al., 1968). The  $\text{Ca}^{2+}$  saturation was obtained by calculating the percentage of  $\text{Ca}^{2+}$  participation in CTC pH 7.0.

#### 5.4.4. Statistical analysis

The results were subjected to analysis of variance using the PROC GLM procedure in the SAS (Statistical Analysis Systems Institute Inc., 2009) in a randomized block experimental model. Regression analysis were performed in experiments I and II, when the results presented significant effects between treatments and the BS,  $\text{Al}^{3+}$  saturation and  $\text{Ca}^{2+}$  saturation over time. Means of treatments were subjected to the F test and compared by the Tukey test ( $p < 0.05$ ) for experiments III and IV. The temporal effect of gypsum, applied singly, on these chemical attributes was characterized selecting three treatments for each experimental area: a) control; b) treatment with intermediate rate of gypsum; c) treatment with high rate of gypsum. When there was an interaction between gypsum and lime, the effect on the chemical attributes was presented by the rate of gypsum in combination with the rate of lime that had the highest effect on chemical attribute investigated.

### 5.5. RESULTS AND DISCUSSION

#### 5.5.1. Characterization of soil chemical attributes at the beginning of the experiments

Relevant chemical quality differences in the RZ were found among the experimental areas (Table 3). In general, the topsoil layer of 0.00 to 0.10 m, suggested as diagnostic layer (CQFS-RS/SC, 2004), present chemical quality at beginning of the experiments that not require lime application, except the experiment III (Table 4). This result support the treatments of single input of gypsum in experiments I and II. Regarding the  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , a nutrient added by gypsum,

half of the experimental areas (III and IV) demanded input for soybean cultivation. The chemical quality transition from the topsoil layer towards to the subsurface layers in RZ was observed in all experimental areas, however, at different depths (Table 4). The chemical quality deterioration of the subsoil layer has been reported in Oxisols managed under NTS with low amount of lime input (Amado et al., 2009).

The experimental areas I and II had the deepest transition of chemical quality among the investigated areas being noted at 0.25-0.40 m and 0.40-0.60 m layers, respectively (Table 3 and 4). Thus, in the experiment I the BS decreased by 42.2 % and the  $Al^{3+}$  saturation increased by 250.0 % in the layer 0.25-0.40 m compared to the adjacent upper layer (0.15-0.25 m). In the experiment II, the BS decreasing and  $Al^{3+}$  saturation increasing were 69.5 and 281.5 % respectively, in the layer 0.40-0.60 m compared to the adjacent upper layer (0.25-0.40 m). These experimental sites that present a thicker layer with high chemical quality had in common the adoption of a crop rotation program interspersing soybean with maize and use of winter cover crops. In both, the soil correction program adopted was effective in maintaining the chemical quality favorable to plant root grow in a medium (0.00-0.25 m) and deep (0.00-0.40m) soil layers (Table 4).

The soil of the experimental site III had low chemical quality already in topsoil layers (Table 3 and 4). Thus, the layer of 0.05-0.10 m had a decreased in BS of 26.1 % and an increase in  $Al^{3+}$  saturation of 57.7 % compared to the adjacent upper layer (0.00-0.05 m). The layer of 0.10-0.15 m had a decrease in BS of 55.6 % and an increased in  $Al^{3+}$  saturation of 95.4% compared to the layer 0.05-0.10 m. These results indicate that this experimental area had an inefficient soil correction program characterized by low rate of lime input and with large interval among reapplications. Only for this experimental site, the chemical quality of the layer 0.00-0.10 m was an effective diagnosis layer of the RZ.

The experimental area IV presented satisfactory chemical quality in the surface layer (BS > 65 % and  $Al^{3+}$  saturation < 0.0% in the layer 0.00-0.10 m). However, it showed an abrupt decrease in BS and marked increase in  $Al^{3+}$  saturation in the middle deep soil layer (0.10-0.15 m) (Table 3 and 4), which in relation to the upper adjacent layer (0.05-0.10 m), had a decrease in BS of 84.9 % and  $Al^{3+}$  saturation that was 0.0 % increased to 9.9 %, reaching the critical value [BS < 65 % and  $Al^{3+}$  saturation > 10% (CQFS-RS/SC, 2004)]. In addition, the soil layer of 0.15-0.25 m had a decrease in BS of 32.1 % and an increase in  $Al^{3+}$  saturation of 159.6 % compared to the layer 0.10-0.15 m. This gradient was even more significant in the layer 0.25-0.40 m, with a decrease in BS of 108.9 % and an increase in  $Al^{3+}$  saturation of 104.7 %. This deterioration in chemical quality from the topsoil toward the deepest layers (Table 4), especially

with sharp increase in  $\text{Al}^{3+}$  saturation, has a negative effect on plant root grow and grain yields (Farina et al., 2000). Therefore, the liming program adopted in this experimental area was effective only in amend the shallow topsoil layer of 0.00-0.10 m. In this case, the layer 0.00-0.10 m was not a proper soil layer to diagnostic the chemical quality of the RZ. The liming program with a rate of  $2.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , applied every four years, and in a cropping system with soybean monoculture resulted in limited lime vertical displacement (Caires et al., 2005; Bortoluzzi et al., 2014). Therefore, in order to the chemical quality of the RZ in this experimental area, a soil sampling of subsurface layers (0.10-0.20 or 0.20-0.40 m) would be required similar to what is recommended in the Brazilian Cerrado's region (Quaggio and Raij, 1996; Oliveira et al., 2007), or, alternatively, to sampling a more thicker layer such as the 0.00-0.20 m as advocated in Parana State.

The use of gypsum as a soil amendment for NTS in southern Brazil has increased in last decade, however, there is still no specific criteria for its recommendation. For gypsum recommendation, Oliveira et al. (2007) to the Cerrado Region of Brazil suggested as criteria, the critical contents of  $\text{Ca}^{2+} < 0.5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  or  $\text{Al}^{3+}$  saturation  $> 10.0 \%$  at depth of 0.20-0.40 m. The soils in the experimental areas III and IV meet this criteria of  $\text{Al}^{3+}$  saturation (Table 3). Although, none of the experimental areas presented  $\text{Ca}^{2+}$  content below the critical values ( $\text{Ca}^{2+} < 0.5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) at the beginning of the experiment. However, this critical  $\text{Ca}^{2+}$  content was proposed for the Cerrado soils, which usually has low CTC ( $\cong 6.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), while the soils of the present study had a moderate CTC ( $\cong 12.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ).

### **5.5.2. Improvement in chemical attributes in the RZ associate to lime and gypsum input**

Significant ( $p < 0.05$ ) increases of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{S-SO}_4^{2-}$  contents were observed in the gypsum and lime treatments investigated regardless the experimental area, with increases in whole soil profile (Figure 2). Overall, the vertical displacement of  $\text{S-SO}_4^{2-}$  in RZ was rapid and followed by the  $\text{Ca}^{2+}$  downward movement in all gypsum treatments. Agricultural soils generally have negative charges, which provide adsorption of  $\text{Ca}^{2+}$ , that has a positive charge. Moreover  $\text{S-SO}_4^{2-}$  mobility is larger by its negative charge (Raij, 2010). Furthermore, low initial  $\text{Ca}^{2+}$  contents and  $\text{S-SO}_4^{2-}$  contents accelerate the dissociation of gypsum (Quaggio et al., 1993).

The fast vertical mobility of  $\text{S-SO}_4^{2-}$  is supported by the slight increase in  $\text{S-SO}_4^{2-}$  content in the topsoil layers (0.00-0.05 and 0.05-0.10 m) after 56 (experiments I and II) and 30 months (experiments III and IV) of the beginning of the experiments (Figure 2). This result is justified because this nutrient in the gypsum is in an oxidized form ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), which is repelled

by clay minerals negative charges, remaining in the soil solution, susceptible to displacement by draining water (Farina et al., 2000; Caires et al., 2011a; Nava et al., 2012). Previously, Caires et al. (2011a) reported a strong displacement of  $S-SO_4^{2-}$  from topsoil to deeper soil layers in gypsum ameliorated Oxisols. In this study, elapsed 56 (experiments I and II) and 30 months (experiment III) after the beginning of the experiments, the  $S-SO_4^{2-}$  content in the topsoil layer (0.00-0.10 m) (Figure 2) remained below than the critical values ( $10.0 \text{ mg dm}^{-3}$ ) proposed by Fontes et al. (1982) for the soil layer of 0.00-0.20 m. The  $S-SO_4^{2-}$  content in the topsoil layer had significant ( $p < 0.05$ ) increase only in the treatment with the highest rate of gypsum, except in the experiment IV, in which all gypsum treatments were higher  $S-SO_4^{2-}$  content than the control. These results are similar to those previously reported by Caires et al. (2011a), who did not observe increases in  $S-SO_4^{2-}$  in the topsoil layer of 0.00-0.10 even with  $9.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum input. According to those authors a long period elapsed after application, the presence of negative charges on soil colloids and high cumulative volume of precipitation were associated with the intense downward mobility of  $S-SO_4^{2-}$ . Thus, in this study the increase in  $S-SO_4^{2-}$  content in the topsoil layer after gypsum input was observed only for short-term.

In the experiment I there was  $S-SO_4^{2-}$  content increases of 147.2 % (0.25-0.40 m) and 338.2 % (0.40-0.60 m) after 56 months of the input of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum compared to the control. In the experiment II, these increases were 84.5 % (0.25-0.40 m) and 284.4 % (0.40-0.60 m) (Figure 2b). The  $S-SO_4^{2-}$  content increases in the experiment IV, with a gypsum rate of  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  combined with lime, after 30 months of the input, were 356.1 % (0.25-0.40 m) and 189.6 % (0.40-0.60 m). The increase in  $S-SO_4^{2-}$  content in deep layers of the soil profile after gypsum application has been generally reported in other studies with Oxisols (Quaggio et al., 1993; Caires et al., 2011a; Rampim et al., 2011; Pauletti et al., 2014). A recent study in a clayey Oxisol in the State of Paraná, Pauletti et al. (2014) reported an increase in  $S-SO_4^{2-}$  content in the deep layer 0.80-1.00 m, only 30 months after  $12.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  gypsum input. Improvement in soil structure and an increase in infiltration rate after gypsum application has been reported in studies conducted in the United States (Torbert and Watts, 2014; Watts and Dick, 2014). This result was associated to the increase of  $Ca^{2+}$  content that enhance soil aggregation (Shainberg et al., 1989) and the development of the plant root system in deep soil layers. This improvement in soil hydro-physical properties may contribute to the vertical mobility of the  $S-SO_4^{2-}$  in the soil profile.

In the experimental site III the higher increases  $S-SO_4^{2-}$  content, with a gypsum rates of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  elapsed 30 months of the application, were 271.4 % (0.15-0.25 m) and 189.1 % (0.25-0.40 m) compared to the control (Figure 2c). In the area III this increases in  $S-SO_4^{2-}$

content occurred to a lesser degree compared to the other experimental areas (Table 3), probably due to the high clay content, low pH and low  $S-SO_4^{2-}$  content (Quaggio et al., 1993; Caires et al., 2003). These conditions favor the chemical adsorption of anions such as  $S-SO_4^{2-}$  in the clay minerals positively charged and disfavours its downward movement (Pozza et al., 2007).

The experiments I and II, after 56 months, and experiments III and IV, after 30 months of lime and gypsum application, presented increases in  $Ca^{2+}$  content in whole soil profile. This result was attributed to the formation of the ion pair  $CaSO_4^0$ , which has neutral charge and because it is not attracted by the negative charges on the clay minerals surface, enhance the downward movement in the soil profile along with the water flow (O'Brien and Sumner, 1988; Sumner, 1995; Nava et al., 2012). Therefore, the application of gypsum isolated, in soils with high chemical quality, or combined with lime, in acid soils, was an efficient alternative to improve the NTS in the RS State.

The increases in  $Ca^{2+}$  content in the layer 0.00-0.05 m with a gypsum rate of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  were 42.2, 50.0 and 36.4 % for the experiments I, II and III, respectively, compared to the control treatment. The increase in  $Ca^{2+}$  content in the layer 0.00-0.05 m, in the experiment IV, with a gypsum rate of  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  combined with the lime, was 20.1 % in relation to the control (Figure 2d). Other hand, the increases in  $Ca^{2+}$  content in the subsurface layers with gypsum rate of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  were 152.3 and 90.0 % in the experiment I (Figure 2a); 175.6 and 170.3 % in the experiment II (Figure 2b), and 68.4 and 41.2 % in the experiment III (Figure 2c), in the layers 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m, respectively, compared to the control. In the experiment IV, the  $Ca^{2+}$  content increases in the subsurface layers 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m, with gypsum rate of  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  combined with lime, were 75.0 and 71.2 % (Figure 2d), respectively, compared to the control. These results confirm the gypsum role in increasing the  $Ca^{2+}$  content notadely in Oxisol's subsurface layers managed under NTS as reported previously by Rampim et al. (2011), whom reported increases in  $Ca^{2+}$  contents to a depth of 0.40 m, six months after gypsum application rates up to  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , in an Oxisol.

The increase in  $Ca^{2+}$  content in the RZ is important, especially in the deepest and more acidic layers due to its role in enhancing root growth by stimulate the cell division (Hawkesford et al., 2012). The  $Ca^{2+}$  needs to be in the soil solution near root tips, since its absorption is almost exclusively in the root cap (Taiz and Zeiger, 2009). In addition,  $Ca^{2+}$  is practically immobile in the phloem, so its absorption by the roots in topsoil does not meet the demand for root growth in deeper soil layers (Taiz and Zeiger, 2009). In our study high rates of isolated gypsum ( $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Experiments I, II and III) or when combined with lime ( $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum +  $3.6 \text{ Mg ha}^{-1}$  of lime) (Experiment IV) were required to increase  $Ca^{2+}$  contents in deep

soil layers (Figure 2). This result is associated with a higher S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> leaching and accumulation in these deep layers. Thus, the improvement in chemical attributes in subsoil with application of gypsum and lime will be achieved under high rates, i.e. lower rates of gypsum and lime in clay Oxisols from RS State did not result in improvement of deepest layers (Figure 2).

### 5.5.3. Temporal evolution of soil chemical attributes in the RZ by gypsum and lime input

Interaction ( $p < 0.05$ ) between the time elapsed from the gypsum and lime application was observed for the BS, Ca<sup>2+</sup> saturation and Al<sup>3+</sup> saturation, in all four experiments investigated. The selected gypsum rates for the experiments I, II and III were 3.0 (b) and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> (c) (Figures 3, 4 and 5). The temporal effect of gypsum combined with lime in the experiment IV was characterized selecting the treatments with 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum, and 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum combine with 3.6 Mg ha<sup>-1</sup> of lime (Figure 6).

As expected the temporal effect in the control treatment, regardless the experiment, caused only minor changes in the attributes BS, Ca<sup>2+</sup> saturation and Al<sup>3+</sup> saturation (Figures 3, 4, 5, 6). Therefore, elapsed 54 months after the experiments implementation, there was a little increase in Al<sup>3+</sup> saturation in the experiments I (Figure 3c) and II (Figure 4c). This result was attributed to the natural process of soil acidification and the low rates of lime (2 Mg ha<sup>-1</sup>) and long time elapsed (four years) before the implementation of the experiments. Similar results were presented by Caires et al. (2005) reported in an Oxisol a decrease in the pH after 10 years without liming, followed by an increase in Al<sup>3+</sup> saturation.

In the experiment I, the treatment gypsum rate of 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>, the temporal effect presented a quadratic response to BS (Figure 3a) and Ca<sup>2+</sup> saturation (Figure 3b) in the layers 0.00-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.15 m (Figure 2a). This quadratic response suggests that the gypsum effect reach a maximum point and then decreases elapsed a certain time. The maximum effect in increasing the BS decreased after 30 (0.00-0.05 m), 23 (0.05-0.10 m) and 27 (0.10-0.15 m) months after gypsum application (Figure 3a). In part, this result was attributed to dislocation of Ca<sup>2+</sup> from topsoil to the deeper soil layers (Caires et al., 2011a; Dalla Nora and Amado, 2013; Pauletti et al., 2014). The intermediate gypsum rate did not affect the BS in layers below 0.15 m.

The Al<sup>3+</sup> saturation (Figure 3c) was affected only in the layer 0.40-0.60 m ( $p < 0.05$ ) with intermediate gypsum rate. The effect of gypsum on this deep soil layer was due to the S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> accumulation in this layer (Figure 2a) carrying together the Ca<sup>2+</sup> ion (Figure 2b). This way, the participation of Al<sup>3+</sup> in the CTC in the subsoil was reduced due to an increase in Ca<sup>2+</sup> content

in this layer (Caires et al., 2011a). According to the equation found, the most pronounced effect was 32 months after gypsum application, resulting in decrease of 32.8 % in  $\text{Al}^{3+}$  saturation compared to the zero time. This pronounced effect in the deepest layer of the soil profile is probably associated with the high precipitation volume (5,892 mm) during this 32-month period (Figure 1). In addition, gypsum increased  $\text{S-SO}_4^{2-}$  concentration and enhanced the formation of ion pair  $\text{AlSO}_4^0$  and, mainly, increased the  $\text{Ca}^{2+}$  saturation in the subsoil. The gypsum treatment of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  presented increases in BS ( $p < 0.05$ ) and  $\text{Ca}^{2+}$  saturation ( $p < 0.05$ ), especially in the deepest layers (0.25-0.40 and 0.40-0.60 m). The decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation in these layers followed the quadratic response, with decreases of 35.4 and 45.9 %, respectively, compared to the zero time. Furthermore, the maximum effect on those layers was reached 32.0 and 37.5 months after gypsum application, respectively (Figure 3c). In resume, for this experimental area the highest gypsum rate induced an improvement in deepest layers and last for more time.

The experimental area II had more pronounced changes in chemical attributes induced by the gypsum application than the experimental area I. This result can be explained by the lower clay content, higher  $\text{S-SO}_4^{2-}$  content, higher pH and lower  $\text{Al}^{3+}$  saturation at implementation of the experiment (Table 3). In the treatment with gypsum rate of  $3.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , an increased in BS and  $\text{Ca}^{2+}$  saturation over time was observed in whole soil profile, with a quadratic response for most of the soil layers investigated. The increases in BS and  $\text{Ca}^{2+}$  saturation after 35.5 months in the layer 0.40-0.60 m were 46.3 and 59.0 %, respectively, compared to the zero time. Similarly,  $\text{Al}^{3+}$  saturation followed the quadratic response, with decreases of 37.6 % (after 46 months) and 42.9 % (after 43 months) in the deep layers 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m (Figure 4c), respectively.

In the experiment II, with gypsum rate of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , the  $\text{Al}^{3+}$  saturation in the layer 0.40-0.60 m showed a linear decreasing in response to the application time, suggesting that, in soils with better chemical quality in the topsoil layer, the effect of gypsum input is higher, last for a longer period of time (Figure 4c) and reach deeper soil layers (Raij, 2010; Caires, 2011a). Thus, increases in BS of 63.7 % (Figure 4a) and in  $\text{Ca}^{2+}$  saturation of 56.5 % (Figure 4b), and a decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation of 322.0 % (Figure 4c) were observed in the deep layer 0.40-0.60 m, elapsed 56 months after gypsum application compared to the zero time. Caires et al. (2011b) reported that the gypsum application in an Oxisol without presence of  $\text{Al}^{3+}$  promotes rapid effect on the movement of bases.

The experiments I and II had the temporal evolution of the chemical attributes better detailed (six soil samplings) after gypsum application than the others ones. Although, some improving in chemical quality of the RZ was already observed elapsed six months after gypsum

application, it was more noticeable after 32 months, when accumulated precipitation reached 5,635 mm. Therefore, the improvement in the deepest layers demanded longer time ranging months and higher rates.

The soil of the experimental area III had the lowest chemical quality in relation to other sites investigated, expressed by the higher acidity levels in RZ (Table 3). No increase in BS in any of the sampled soil layers was observed elapsed 15 and 30 months after gypsum application ( $3.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Figure 5a). This result reinforces that for acidic soils there is a need of lime combined with gypsum input, in order to increase the BS. In studies conducted by Caires et al. (2008) the authors found moving of bases by high rates application of lime and with frequent reapplications. However, the application of gypsum accelerates the nutrient leaching process for the deeper soil layers (Dalla Nora et al., 2014).

The gypsum input provided gradual increase in the  $\text{Ca}^{2+}$  saturation, and after 30 months this effect was noted in all layers up to 0.40 m depth compared to the zero time (Figure 5b). The increase in  $\text{Ca}^{2+}$  content in the whole RZ, provided by the gypsum application, in acidic soils is an important result, since the lime, when applied on the surface seldom provides improvement in deep layers (Bortuluzzi et al, 2014; Dalla Nora, et al, 2014.). Although, Oliveira and Pavan (1996), Caires et al. (2008) and Caires (2013) reported increase in  $\text{Ca}^{2+}$  content after long period of time elapsed after high rates of lime application in surface or by application of lime in soil already corrected. According to those authors the surface lime application in soil already ameliorated could enhance the vertical movement of fine lime particles in the soil profile. The decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation (14.3 %) was observed only in the layer 0.25-0.40 m ( $p < 0.05$ ), elapsed 30 months after gypsum application (Figure 5c). This layer presented the largest increase in  $\text{S-SO}_4^{2-}$  content (Figure 2c), probably favoring the formation of  $\text{AlSO}_4^+$  that is dislocated to deeper layers (Raij, 2010).

The gypsum rate of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  promoted increases in BS ( $p < 0.05$ ) in all layers, except in the 0.05-0.10 and 0.40-0.60 m, elapsed 30 months after application, with most pronounced increases in the layers 0.15-0.25 (59.5 %) and 0.25-0.40 m (26.2 %) compared to the zero time (Figure 5a). However, no increases in BS were observed after 15 months in any layer compared to the zero time. These results suggest that increasing the BS in acidic soils by gypsum applications require a high rate ( $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) and a medium time (30 months). This treatment also increased the  $\text{Ca}^{2+}$  saturation ( $p < 0.05$ ) in the whole soil profile (Figure 5b), results similar to those observed in the experiments I and II. Increases in the surface layers (0.00-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.15 m) were observed after 15 months, reaching the deepest layers after 30 months, with increases of 126.8 % (0.15-0.25 m), 87.8 % (0.25-0.40 m) and 57.7 % (0.40-0.60



m). A pronounced decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation was observed in the layers 0.10-0.15, 0.15-0.25 and 0.25-0.40 m (Figure 5c), which had the highest  $\text{Al}^{3+}$  contents. This decrease was 68.4 % (0.10-0.15 m), 76.2 % (0.15-0.25 m) and 76.3 % (0.25-0.40 m), elapsed 30 months after application, compared to the zero time. These layers of 0.15-0.25 and 0.25-0.40 m presented the highest increases in  $\text{S-SO}_4^{2-}$  contents (Figure 2c).

In the experiment IV, the treatment with gypsum rate of  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  increased the BS compared to the zero time ( $p < 0.05$ ) from the layer 0.10-0.15 m to the deepest layer investigated, elapsed 30 months after application (Figure 6a), with the most pronounced increases observed in the layers 0.15-0.25 m (38.5 %) and 0.25-0.40 m (50.7 %). This result was probably related to the abrupt transition of chemical quality at the beginning of the experiment, which presented satisfactory quality in the layer 0.00-0.10 m and low in the others. Increases in  $\text{Ca}^{2+}$  saturation were observed, as in the other experiments, in the whole soil profile elapsed 30 months after gypsum application, except in the deepest layer (Figure 6b), with increases of 146.7 % in the layer 0.15-0.25 m and 188.3 % in the layer 0.25-0.40 m compared to the zero time. The  $\text{Al}^{3+}$  saturation was practically zero up to 0.15 m, elapsed 30 months after the gypsum input, and decreases were observed in the layers of 0.25-0.40 m (30.5 %) and 0.40-0.60 m (20.1 %) compared to the zero time (Figure 6c). Therefore, based on the results found in the experiments II and IV, the effect of gypsum in increasing the BS,  $\text{Ca}^{2+}$  saturation and decrease the  $\text{Al}^{3+}$  saturation was enhanced when the shallow soil layer had high quality at beginning of the experiment. This result support the general recommendation under acidic soils of first apply lime aiming improve the chemical quality of the topsoil layer of NTS, and after this amelioration apply gypsum to improve chemical quality of the subsoil layers.

The treatment with  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum combined with  $3.6 \text{ Mg ha}^{-1}$  of lime, elapsed 30 months after application, had increases in BS ( $p < 0.05$ ) in the whole soil profile, except in the layer 0.00-0.05 m, which was already slightly higher than 80 % at the beginning of the experiment (Figure 6a). The soil layers of 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m had increases of 141.4 and 144.7 %, respectively, compared to the zero time. The  $\text{Ca}^{2+}$  saturation had pronounced increase ( $p < 0.05$ ) in the RZ (0.00 to 0.40 m) (Figure 6b), with increases of 136.3 % (0.25-0.40 m) and 152.0 % (0.40-0.60 m) compared to the zero time. However,  $\text{Ca}^{2+}$  saturation increases were similar in the treatments gypsum single application and in gypsum combined with lime. The  $\text{Al}^{3+}$  saturation decreases were observed ( $p < 0.05$ ) in all evaluated layers, noting that the  $\text{Al}^{3+}$  was fully neutralized up to the depth of 0.15 m (Figure 6c). In addition, the layers of 0.15-0.25, 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m had  $\text{Al}^{3+}$  saturation decreases of 228.2, 47.7 and 34.0 %, respectively.

respectively. Therefore, decreases in  $\text{Al}^{3+}$  saturation in subsurface layers were more pronounced when gypsum was combined with lime compared to gypsum applied singly.

In our study, intermediate rates of gypsum ( $3.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) in single input little improve the chemical soil attributes over time. However, higher rates of gypsum singly (Experiments I, II and III) or combined with lime input (Experiment IV) resulted in improving chemical soil attributes in whole RZ. In the experiment I the most pronounced effect was observed in deep layers elapsed 30 months after the application of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum (Figure 3). Already, in Experiment II the most pronounced effect in increasing the BS and  $\text{Ca}^{2+}$  saturation besides the decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation was noted in the layer of 0.40-0.60 m elapsed 56 months of the chemical inputs (Figure 4). This result was associate to lower clay content and better chemical attributes of the Experiment II when compared to I (Table 3), accelerating the  $\text{Ca}^{2+}$  ion downward movement in RZ. The experiment III, which had the lowest chemical quality among the sites investigated (Table 3), showed increased in BS and reduction of  $\text{Al}^{3+}$  saturation in the layer 0.25-0.40 m (Figure 5) elapsed 30 months of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum input. For experiment IV (Figure 6) higher increments in  $\text{Ca}^{2+}$  saturation and BS and decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation was observed, elapsed 30 months after combined input of gypsum and lime highlighting the synergistic effect of these inputs. The positive effect of the lime interaction with gypsum on improving soil chemical attributes was also reported by studies conducted under Oxisols (Caires et al., 2008; Raij, 2010; Dalla Nora et al., 2014; Pauletti et al., 2014). The conditions of the abrupt chemical quality gradient from the surface toward the deepest layers observed in experiment IV, has been frequently reported in soils managed under long-term NTS with superficial lime input (Bortuluzzi et al., 2014). In order to sort out this problem it has been recommended to temporally interrupt the NTS aiming the lime incorporation in RZ, and to promote vertical redistribution of immobile nutrients by using conventional tillage (CT) (Bortuluzzi et al., 2014). In the four experiments investigated in the present study, the chemical quality gradient in RZ was mitigated by the surface application of gypsum singly, specially under high chemical quality of topsoil, and even with more pronounced effect by combined application with lime avoiding the NTS interruption that could deplete soil organic matter, decrease soil aggregation and interrupt the *continuity* of the *pore* system.

The downward movement of bases in the soil profile, induced by gypsum combined with lime or singly, was related to the total precipitation (Figure 1). Therefore, complementary soil management practices that improve the soil *physico-hydric* properties that drives the water infiltration rate such as, SOM content, biological pores, macro aggregates and soil cover

are important to enhance gypsum and lime effect in ameliorate subsoil layers under continuous NTS (Shainberg et al., 1989; Torbert and Watts, 2014; Watts and Dick, 2014).

## 5.6. CONCLUSIONS

The surface application of gypsum, proportionally to the rate input, increases the  $\text{Ca}^{2+}$  content and decreases the  $\text{Al}^{3+}$  saturation in the whole soil profile, and especially, in the rooting zone (0.00-0.40 m). This amelioration was associated with the  $\text{S-SO}_4^{2-}$  downward movement in the soil profile. The high chemical quality in topsoil accelerated and intensified the subsoil amelioration process induced by gypsum input.

The maximum effect of gypsum input in improving chemical quality was observed in a period exceeding 30 months, lasting for up to 54 months. The increase in BS and decrease in  $\text{Al}^{3+}$  saturation in subsoil are enhanced by the combination with lime or by applying high rate of gypsum ( $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) in a single application.

The combination of lime with gypsum presented a complementary effect, being more efficient than gypsum applied singly. In this case, the gradient of chemical attributes in rooting zone of dystrophic Oxisol was mitigated, avoiding the no-till discontinuity.

## 5.7. REFERENCES

- Amado TJC, Pes LZ, Lemainski CL, Schenato RB. Chemical and physical attributes of Oxisols and their relation with irrigated corn and common bean yields. *R Bras Ci Solo*. 2009;33:831-43.
- Beaton JD, Burns GR, Platou J. Determination of sulphur in soils and plant material. Washington, DC: Tech. Bull. Sulphur Inst.; 1968.
- Blanco-Canqui H, Lal R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Sci Soc Am J*. 2008;72:693-701.
- Bortoluzzi EC, Parize GL, Korchagin J, Silva VR, Rheinheimer DS, Kaminski J. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. *R Bras Ci Solo*. 2014;38:262-71.
- Caires EF. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. LOCAL: International Plant Nutrition Institute; 2013. (Informações Agronômicas, 141).
- Caires EF, Alleoni LRF, Cambri MA, Barth G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. *Agron J*. 2005;97:791-8.

- Caires EF, Blum J, Barth G, Garbuio FJ, Kusman MT. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. *R Bras Ci Solo*. 2003;27:275-286.
- Caires EF, Joris HAW, 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 Manage*. 2011a;27:45-53.
- Caires EF, Maschietto EHG, Garbuio FJ, Churka S, Joris HAW. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. *Sci Agric*. 2011b;68:209-16.
- Caires EF, Pereira Filho PRS, Zardo Filho R, Feldhaus IC. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. *Soil Use Manage*. 2008;24:302-9.
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo - CQFSRS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10<sup>a</sup>.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul/UFRGS; 2004.
- Crusciol CAC, Artigiani ACCA, Arf OA, Filho AC, Soratto RP, Nascente AS, Alvarez RCF. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. *Catena*. 2016;137:87-99.
- Dalla Nora D, Amado TJC. Improvement in chemical attributes of Oxisol Subsoil and crop yields under no-till. *Agron J*. 2013;105:1393-403.
- Dalla Nora D, Amado TJC, Bortolotto RP, Ferreira AO, Reichard K, Santi AL. Subsoil chemical amelioration and crop yields under contínuos long-term no-till in a subtropical Oxisol. *Afric J Agric Res*. 2014;9:3338-49.
- Debarba L, Amado TJC. Desenvolvimento de sistemas de produção de milho no sul do Brasil com características de sustentabilidade. *R Bras Ci Solo*. 1997;21:473-80.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 2<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS; 2006.
- Ernani PR. Alterações em algumas características químicas na camada arável do solo pela aplicação de gesso agrícola sobre a superfície de campos nativos. *R Bras Ci Solo*. 1986;10:241-5.
- Farina MPW, Channon P, Thibaud GR. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Long-term growth effects. *Soil Sci Soc Am J*. 2000;64:646-51.
- Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha - FEBRAPDP. 13<sup>o</sup> Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha. Ponta Grossa; 2012. (Boletim Informativo, 49)

- Fontes MPF, Novais RF, Alvarez VVH, Borges AC. Nível crítico de enxofre em Latossolos e recuperação do sulfato adicionado por diferentes extratores químicos, em casa de vegetação. *R Bras Ci Solo*. 1982;6:226-30.
- Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerring J, Moller IS, White P. Functions of macronutrients. In: Marschner P, editor. *Mineral nutrition of higher plants*. 3rd.ed. New York: Elsevier; 2012. p.171-8.
- Köppen WP. *Grundriss der Klimakunde*. Berlin: Walter de Gruyter; 1931.
- Leivas JF, Andrade RG, Victoria DC, Torresan FE, Vicente LE, Teixeira AHC, Bolfe1 ELB, Barros TRB. Avaliação do índice de vegetação padronizado no monitoramento indicativo de estiagens em períodos críticos da soja no sul do Brasil. *R Bras Cartogr*. 2014;66/5:1145-1155.
- Luiz AJB, Formaggio AR, Epiphanyo JCN, Arenas-Toledo JMA, Goltz E, Brandão D. Estimativa amostral objetiva de área plantada regional, apoiada em imagens de sensoriamento remoto. *Pesq Agropec Bras*. 2012;47:1279-1287.
- Manual de adubação e calagem para cultivos agrícolas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Trigo Soja*; 56:5-34. 1981.
- Medeiros JC, Albuquerque JA, Mafra AL, Dalla Rosa J, Gatiboni LC. Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. *Semina: Ci Agron*. 2008;29:799-806.
- Miyazawa M, Pavan MA, Franchini JC. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. *Braz Arch Biol Technol*. 2002;45:251-6.
- Nava G, Ernani PR, Sá AA, Pereira AJ. Soil Composition and nutritional status of apple as affected by long-term application of gypsum. *R Bras Ci Solo*. 2012;36:215-22.
- O'Brien LO, Sumner ME. Effects of phosphogypsum on leachate and soil chemical composition. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 1988;19:1319-29.
- Oliveira EL, Pavan MA. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. *Soil & Till Res*. 1996;38:47-57.
- Oliveira FA, Sfredo GJ, Castro C, Kleper D. *Fertilidade do solo e nutrição de soja*. Londrina: EMBRAPA; 2007. (Circular Técnica, 50).
- Pauletti V, Pierrri L, Ranzan T, Barth G, Motta ACV. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. *R Bras Ci Solo*. 2014;38:495-505.
- Peruzzo G, Wietholter S, Romam E. Efeito do gesso no rendimento e crescimento radicular de algumas culturas. *Passo Fundo: Embrapa/CNPQ*; 1990.

- Pöttker D, Ben JR. Calagem para uma rotação de culturas no plantio direto. R. Bras Ci Solo. 1998;22:675-684.
- Pozza AAA, Curi N, Costa ETS, Guilherme LBG, Sá JJG, Marques M, Motta PEF. Competitive retention and desorption of inorganic anions on natural soil gibbsite. Pesq Agropec Bras. 2007;42:1627-1633.
- Quaggio JA, Raij Bvan. 1996. Correção da acidez do solo. In: Raij Bvan, Cantarella H, Quaggio, JA, Furlani AMC, editors. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, SP, Brazil; 1996. p.14-19.
- Quaggio JA, Raij Bvan, Gallo PB, Mascarenhas HAA. Resposta da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. Pesq Agropec Bras. 1993;28:375-83.
- Raij Bvan. Gesso na agricultura. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. São Paulo: IPNI; 2010. (Informações Agronômicas, 122).
- Rampim L, Lana MC, Frandoloso JF, Fontaniva S. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. R Bras Ci Solo. 2011;35:1687-98.
- Shainberg I, Sumner ME, Miller WP, Farina MPW, Pavan MA, Fey MV. Use of gypsum on soils. Adv Soil Sci. 1989;9:1-111.
- Soratto RP, Crusciol CAC. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. R Bras Ci Solo. 2008;32:675-688.
- Statistical Analysis Systems Institute Inc. - SAS. SAS/Sat: User's Guide: version 9.2. Cary; 2009.
- Sumner ME. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: Jayawardane NS, Stewart BA, editors. Subsoil management techniques. Athens: Lewis Publishers; 1995. p.147-85.
- Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy. Natural Resources Conservation Service. 11th ed. Washington, DC; 2010.
- Taiz L, Zeiger E. Fisiologia vegetal. 4<sup>a</sup>.ed. Porto Alegre: Artmed; 2009.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2<sup>a</sup>.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995. (Boletim Técnico, 5).
- Torbert HA, Watts DB. Impact of flue gas desulfurization gypsum application on water quality in a coastal plain soil. J Environ Qual. 2014;43:273-80.

- Watts DB, Dick WA. Sustainable Uses of FGD Gypsum in Agricultural Systems: Introduction. *J Environ Qual*. 2014;43:246-52.
- Zandoná RR, Beutler NA, Burg GM, Barreto CF, Schmidt MR. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. *Pesq Agropec Trop*. 2015;45:128-37.

**Table 1. Location of the experiments with its coordinates, altitude, annual precipitation and acreage of soybeans in RS.**

Experiment	Municipality	Coordinates		Altitude	Annual precipitation	Temperature average	Soybean acreage*
				m	mm	°C	ha
<b>1</b>	Carazinho	28°19'S	52°55'W	595	2020	16	28000
<b>2</b>	Carazinho	28°17'S	52°47'W	617	2020	16	28000
<b>3</b>	São Miguel das Missões	28°40'S	54°23'W	265	1651	15	48000
<b>4</b>	Tupanciretã	29°00'S	53° 94'W	507	1766	17	116780

\* Main grain crops. Source: Luiz et al. (2012)



**Table 2: Crop sequence performed in Experiments I, II, III and IV, addition of the crop cycle, fertilizer used and the time of evaluation of the yield.**

<b>Experiment I</b>			
<b>Crops</b>	<b>Cycle</b>	<b>Fertilizing</b>	<b>Measurement of yield</b>
<b>Black oat</b>	May to Sep./2009	Without fertilization	Experiment implantation
		85.5 kg ha <sup>-1</sup> of N (9 kg ha <sup>-1</sup> at seeding and 76.5 kg ha <sup>-1</sup> in topdress), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O; the source of N was urea, [CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ] (45% N)	Evaluated in February 2010
<b>Corn</b>	Sep./2009-Feb./2010	11.5 of N, 57.5 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 57.5 of K <sub>2</sub> O (formulated fertilization N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O); 20.25 kg ha <sup>-1</sup> of N in topdress (urea)	It was not harvested due to frost at flowering
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov./2010	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in April 2011
<b>Soybean</b>	Nov./2010-Apr./2011	Without fertilization	Cover crop
<b>Black oat</b>	May to Oct./2011	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in February 2012
<b>Soybean</b>	Nov./2011-Apr./2012	Without fertilization	Cover crop
<b>Black oat</b>	May to Aug./2012	85.5 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea) (9 kg ha <sup>-1</sup> at seeding and 76.5 kg ha <sup>-1</sup> in topdress), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O	Evaluated in February 2013
<b>Corn</b>	Sep./2012-Feb./2013	11 of N, 55 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 55 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 18 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	Evaluated in November 2013
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov./2013	4.4 of N, 44 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 44 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in March 2014
<b>Soybean</b>	Nov./2013-Mar./2014		
<b>Experiment II</b>			
<b>Black oat</b>	May to Sep./2009	Without fertilization	Experiment implantation
<b>Soybean</b>	Nov./2009-Apr./2010	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in April 2010
<b>Oat/radish</b>	May to Aug./2010	Without fertilization	Cover crop
		85.5 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea) (9 kg ha <sup>-1</sup> at seeding and 76.5 kg ha <sup>-1</sup> in topdress), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O	Evaluated in February 2011
<b>Corn</b>	Oct./2010-Feb./2011	Without fertilization	Cover crop
<b>Black oat</b>	May to Sep./2011	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in March 2012
<b>Soybean</b>	Nov./2011-Mar./2012	Without fertilization	Cover crop
<b>Black oat</b>	May to Sep./2012	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in March 2013
<b>Soybean</b>	Nov./2012-Mar./2013	11 of N, 55 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 55 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 18 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	Evaluated in November 2013
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov./2013		Not evaluated by problems at harvest
<b>Soybean</b>	Nov./2013-Mar./2014	4.4 of N, 44 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 44 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	
<b>Experiment III</b>			
<b>Black oat</b>	May to Sep./2011	Without fertilization	Experiment implantation
<b>Soybean</b>	Nov./2011-Mar./2012	4.2 of N, 42 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 42 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Not evaluated
		10.5 of N, 52.5 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 52.5 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 18 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	Evaluated in November 2012
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov./2012	4.2 of N, 42 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 42 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in March 2013
<b>Soybean</b>	Nov./2012-Mar./2013	10.5 of N, 52.5 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 52.5 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 18 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	Evaluated in November 2013
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov./2013	4.2 of N, 42 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 42 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in March 2013
<b>Soybean</b>	Nov./2013-Mar./2014		
<b>Experiment IV</b>			
<b>Black oat</b>	May to Sep./2011	Without fertilization	Experiment implantation
<b>Soybean</b>	Nov./2011-Mar./2012	4.6 of N, 46 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 46 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Not evaluated
		11 of N, 55 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 55 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 22.25 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	Evaluated in November 2012
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov./2012	4.4 of N, 44 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 44 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluated in March 2013
<b>Soybean</b>	Nov./2012-Mar./2013	Without fertilization	Cover crop
<b>Black oat</b>	May to Set./2013	4.6 of N, 46 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 46 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Not evaluated
<b>Soybean</b>	Nov./2013-Mar./2014		

The source of N was urea [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>] (45% of N), P was triple superphosphate Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O (45% of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and K was potassium chloride (60% de K<sub>2</sub>O); Corn (*Zea mays* L.); Wheat (*Triticum aestivum* L.); Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]; Oilseed radish (*Raphanus sativus* L.); Black oat (*Avena strigosa* Schreb).

**Table 3. Soil chemical attributes before implementation of the treatments in the four experimental areas in dystrophic Oxisol managed under no-tillage system in the RS.**

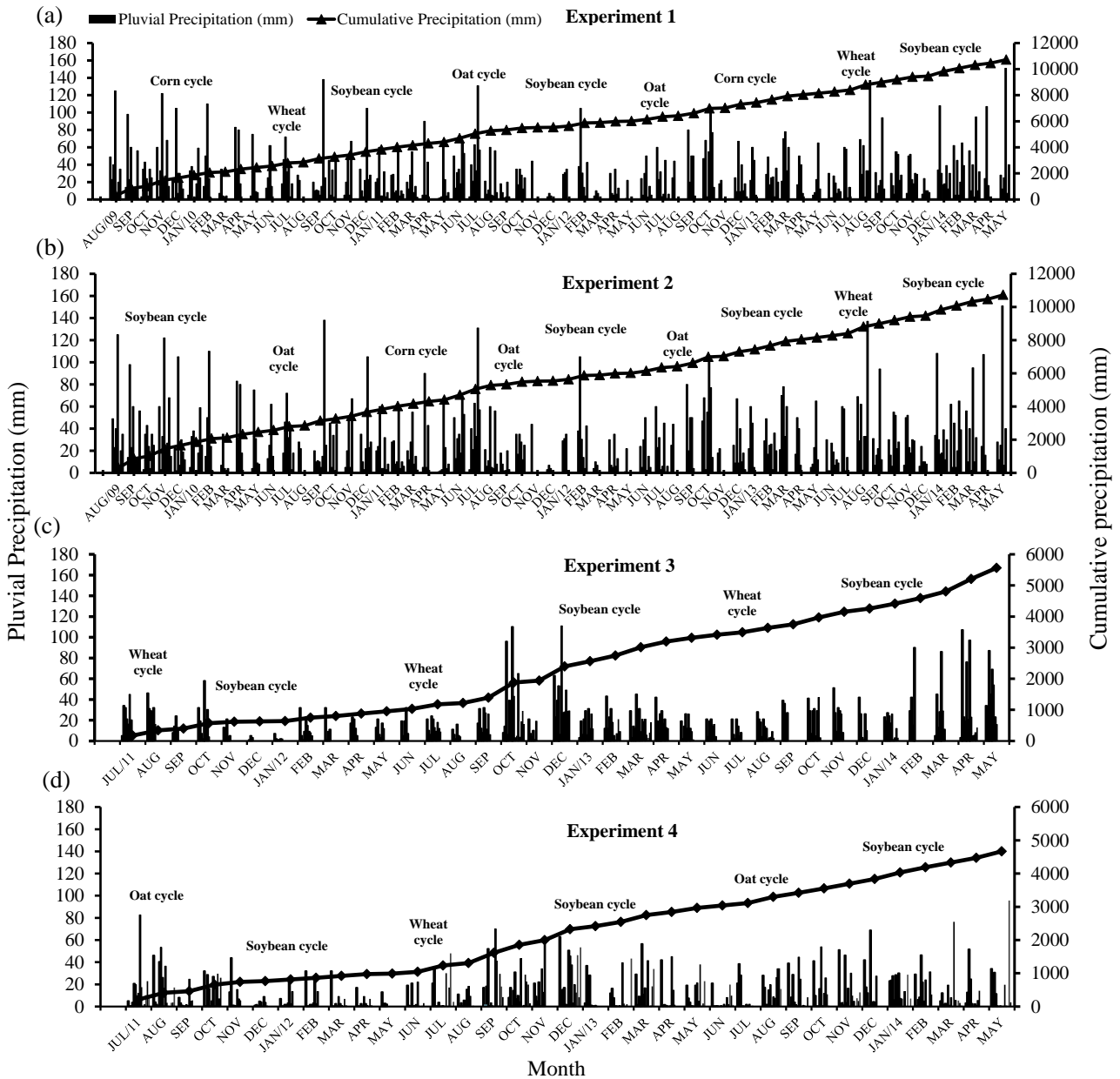
Experiments with Crop Rotation in summer													
Depth	pH	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca/Mg	CEC <sub>pH7,0</sub>	P	S	BS	Al	Clay	SOM
(m)	H <sub>2</sub> O	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	---mg dm <sup>-3</sup> --			-----%-----	----g kg <sup>-1</sup> ----	
Experiment I (August 2009)													
0.00-0.05	5.6	0.0	6.7	3.5	0.18	1.9	15.6	28.3	8.6	68.2	0.0	530.0	3.9
0.05-0.10	5.6	0.0	6.1	3.5	0.13	1.7	14.9	10.1	17.3	67.6	0.0	600.0	3.4
0.10-0.15	5.4	0.2	5.4	3.2	0.07	1.7	14.8	5.0	12.9	59.9	1.8	670.0	2.8
0.15-0.25	5.2	0.4	4.3	3.0	0.05	1.4	15.2	2.6	10.8	49.5	4.6	680.0	2.0
0.25-0.40	4.9	0.8	2.5	2.6	0.04	1.0	15.6	1.1	14.0	34.8	16.1	700.0	1.6
0.40-0.60	4.5	0.9	2.1	2.3	0.03	0.9	15.3	0.8	15.1	30.9	23.9	740.0	1.1
Experiment II (August 2009)													
0.00-0.05	5.9	0.0	4.9	2.2	0.40	2.2	11.6	62.8	16.9	65.6	0.0	240.0	3.6
0.05-0.10	5.7	0.0	4.2	2.0	0.36	2.1	10.3	27.0	14.5	64.9	0.0	320.0	2.3
0.10-0.15	5.7	0.0	3.3	2.0	0.35	1.6	9.7	16.6	10.4	59.1	0.0	370.0	1.7
0.15-0.25	5.4	0.1	2.6	1.8	0.33	1.4	9.4	4.07	8.05	51.4	1.3	460.0	1.3
0.25-0.40	5.1	0.4	2.5	1.3	0.25	1.9	11.4	2.40	9.6	37.8	8.1	500.0	1.3
0.40-0.60	4.8	1.2	1.8	0.7	0.17	2.5	12.2	0.97	7.2	22.3	30.9	520.0	0.7
Experiments without Crop Rotation in summer													
Experiment III (August 2011)													
0.00-0.05	5.0	0.5	4.5	2.8	0.46	2.0	16.2	29.2	4.9	54.4	5.6	420.0	3.9
0.05-0.10	4.6	1.2	3.1	3.1	0.23	1.0	13.4	6.8	2.3	43.1	15.3	600.0	1.5
0.10-0.15	4.3	1.8	1.9	1.2	0.15	0.9	14.8	3.6	1.1	27.7	29.9	650.0	0.9
0.15-0.25	4.2	2.5	1.5	1.7	0.09	0.9	13.2	2.4	6.2	21.0	42.3	770.0	0.9
0.25-0.40	4.2	2.4	1.4	1.6	0.06	0.9	11.6	1.6	4.7	23.3	43.2	750.0	0.6
0.40-0.60	4.2	2.1	1.2	1.4	0.06	0.8	11.5	1.8	1.6	23.8	43.3	650.0	0.7
Experiment IV (August 2011)													
0.00-0.05	6.2	0.0	6.5	3.5	0.37	1.9	12.5	14.7	5.2	82.2	0.0	295.0	3.3
0.05-0.10	6.1	0.0	4.7	2.3	0.23	2.0	10.5	12.7	5.2	68.4	0.0	335.0	2.6
0.10-0.15	5.0	0.5	2.3	2.2	0.15	1.1	12.5	10.7	4.2	37.0	9.9	400.0	2.5
0.15-0.25	4.7	1.3	1.7	1.8	0.11	0.9	13.0	4.0	2.4	28.0	25.7	440.0	2.3
0.25-0.40	4.4	2.9	1.4	1.1	0.10	1.2	20.0	2.3	5.7	13.4	52.6	500.0	1.9
0.40-0.60	4.2	4.3	1.1	0.5	0.08	1.1	22.3	0.9	12.1	9.6	66.9	610.0	1.2

Al- Aluminum: extracted with KCl 1 mol L<sup>-1</sup> and titrated with NaOH 0.0125 mol L<sup>-1</sup>, Ca- Calcium: extracted with KCl 1 mol L<sup>-1</sup> and determined by atomic absorption spectrophotometry, Mg- Magnesium: extracted with KCl 1 mol L<sup>-1</sup> and determined by atomic absorption spectrophotometry, K- Potassium: extracted with Mehlich-I solution, CEC<sub>pH7,0</sub>- cation exchange capacity in pH 7,0, P- Phosphorus: extracted with Mehlich-I solution, S- Sulfur: extraction with Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (500 mg L<sup>-1</sup> of P) and determined by turbidimetry, BS- Base saturation, SOM- Soil organic matter: extracted by wet combustion.

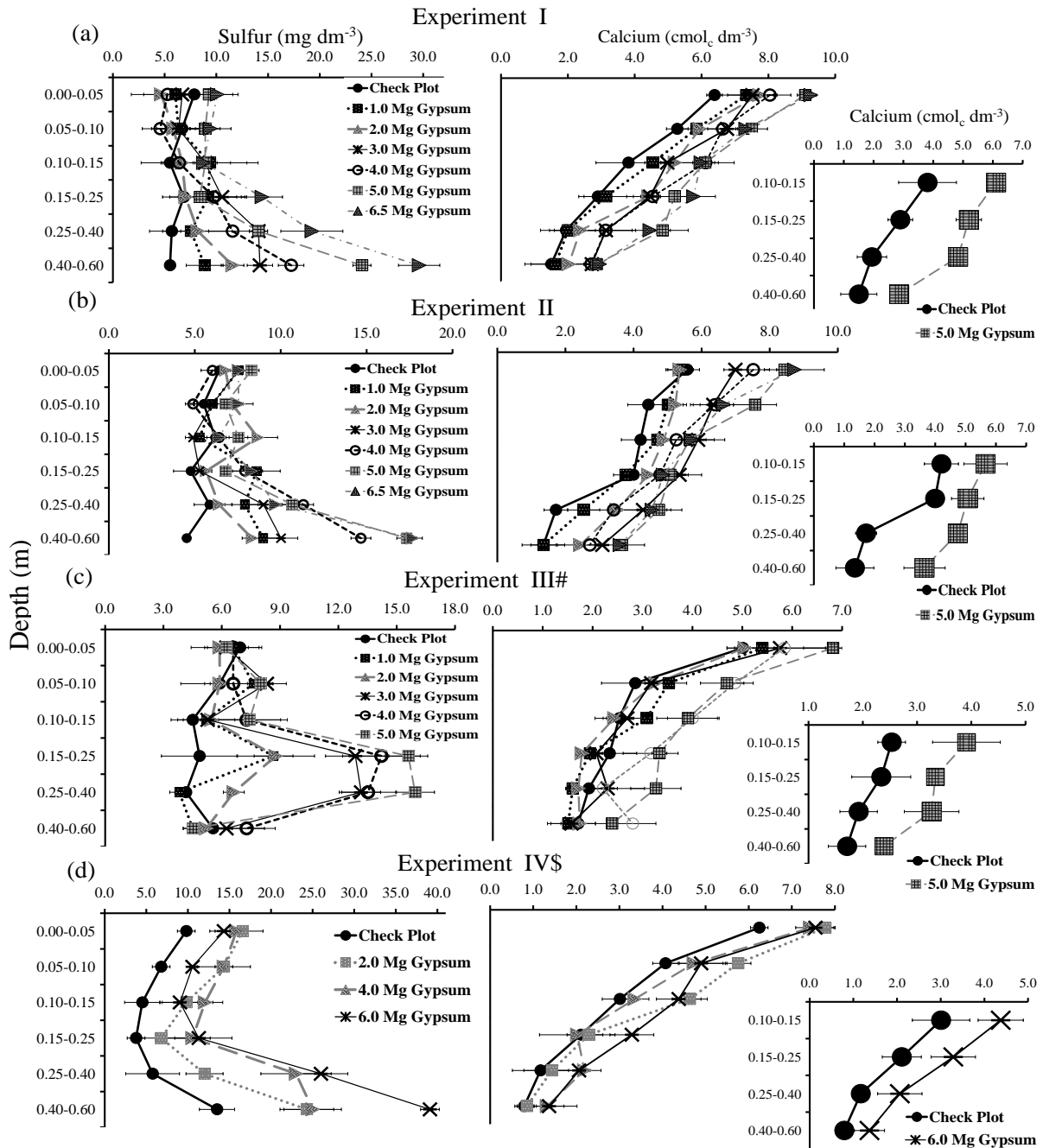
**Table 4. Response probability classes liming, gypsum and sulfur for the four experiments and depth of transition from chemical quality.**

Inputs	Probability of response to inputs investigated in Experimental			
	I	II	III	IV
<b>Lime</b> <sup>(1)</sup>	Low	Low	High	Low
<b>Sulfur</b> <sup>(2)</sup>	Low	Low	High	High to soybean, Low to corn and wheat
<b>Gypsum</b> <sup>(3)</sup>	Low	Low	High according to Al saturation	High according to Al saturation
<b>Transition depth of chemical quality</b> <sup>(4)</sup>	0.25-0.40 m	0.40-0.60 m	0.05-0.10 m	0.10-0.15 m

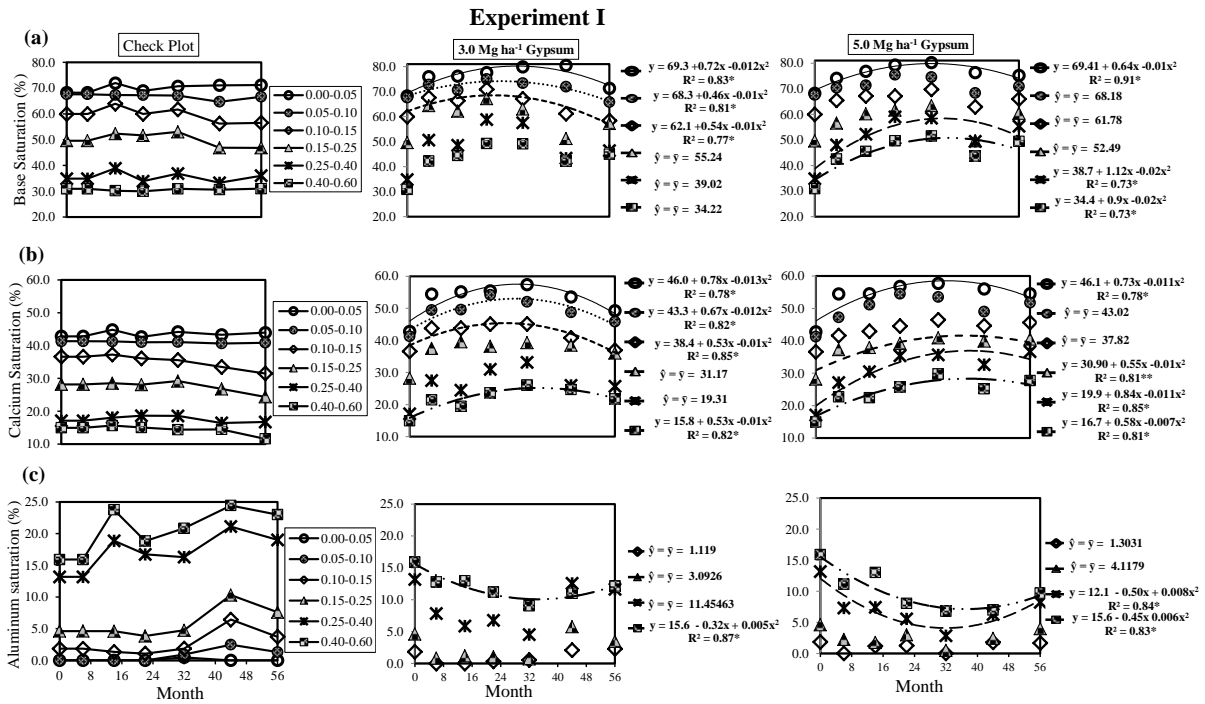
<sup>(1)</sup> Criteria for response to liming: pH > 5.5; basis saturation > 65%, Al saturation < 10% according to CQFS-RS/SC (2004); <sup>(2)</sup> Critical limit sulfur to legumes (soybean) 10.0 mg dm<sup>-3</sup> and grasses (wheat and corn) 5.0 mg dm<sup>-3</sup> according to CQFS-RS/SC (2004); <sup>(3)</sup>Gypsum on the RS/SC is not recommended, the criteria for the Cerrado are Al saturation > 20% and Ca < 0.5 cmolc dm<sup>-3</sup>; <sup>(4)</sup>Transition from chemical quality according to Al saturation and basis saturation.



**Figure 1: Daily and cumulative precipitation during the experimental period for the Experiments I, II, III and IV, beyond of evaluated crops in the experiments. Source: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).**

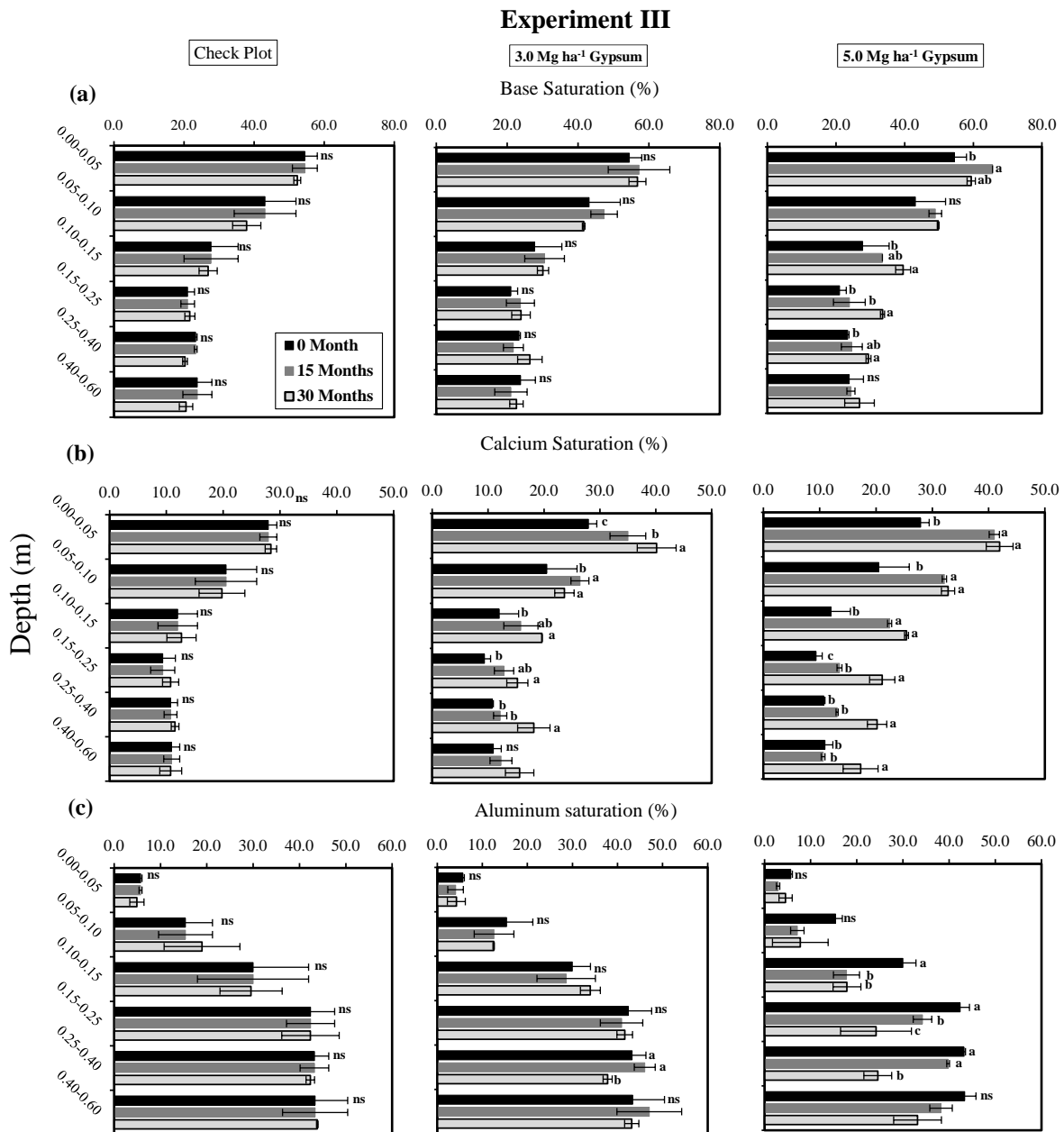


**Figure 2: Effect of gypsum rates on calcium and sulfur in the Experiment I after 56 months (a), in Experiment II after 56 months (b), in Experiment III after 30 months (c) and Experiment IV after 30 months (d) the application of treatments. # Average of sulfur and calcium between treatments with lime and the treatments that did not receive due to the significant interaction between rates of gypsum and lime; \$ Averages of sulfur and calcium for gypsum rates combined 3.6 Mg ha<sup>-1</sup> of lime due to the interaction between rates of gypsum and lime. Error bars represent 95% confidence limits for the average.**



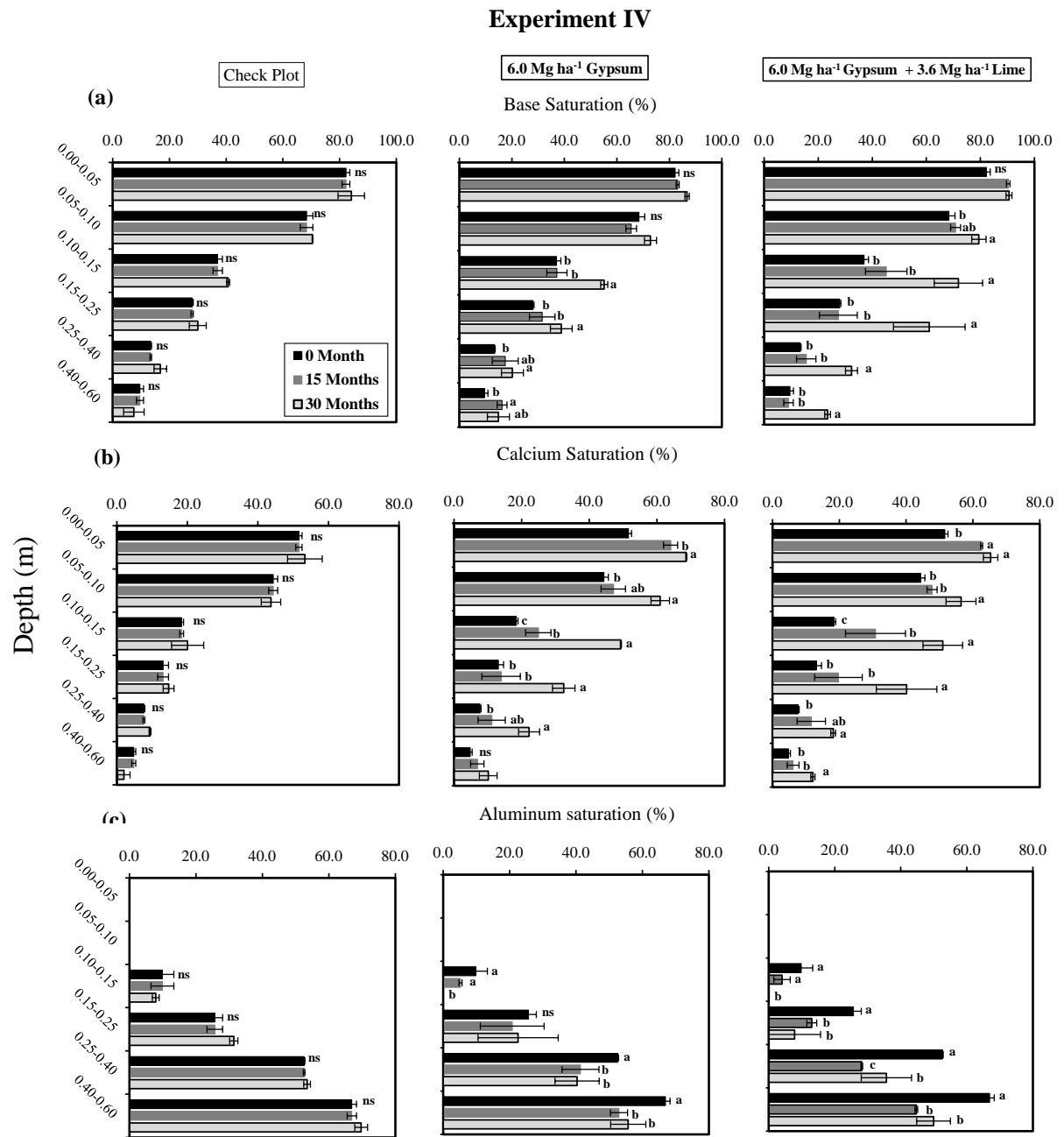
**Figure 3: Time Effect of rates 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum on the saturation Ca (a), base saturation (b) and Al saturation (c) for Experiment I. \* Significant at 5% error probability; \*\* Significant at 1% probability of error.**





**Figure 5: Time effect of rates 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum on the saturation Ca (a), base saturation (b) and Al saturation (c) for Experiment III. <sup>ns</sup>Not significant at 5% error probability; Equal letters on the bars for the same depth do not differ significantly at 5% probability of error.**





**Figure 6:** Time effect of rates 0.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum; 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum and 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum + 3.6 Mg ha<sup>-1</sup> of lime on the saturation Ca (a), base saturation (b) and Al saturation (c) for Experiment IV. <sup>ns</sup>Not significant at 5% error probability; Equal letters on the bars for the same depth do not differ significantly at 5% probability of error.



## 6. ARTIGO II - MODERN HIGH YIELD MAIZE, WHEAT AND SOYBEAN CULTIVARS AFFECTED BY GYPSUM AND LIME APPLICATION IN NO-TILL OXISOL

**\*Artigo formatado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo**

### 6.1. ABSTRACT

The modern maize, wheat and soybean cultivars usually have the characteristics of short cycle, high shoot-root ratio and great nutrient input response. Frequently, continuous no-tillage system (NTS) create a gradient of chemical soil quality through root zone (RZ). This characteristic results in yield penalty under acid subsoil and water stress conditions. This study aimed to evaluate the effect of gypsum, applied singly or in combination with lime, on the yield of cultivars used in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The study consisted of four experiments conducted in typic Hapludox managed under NTS. The experimental design used was the randomized blocks with three replications. The experiments I and II were conducted in soils that had already satisfactory chemical soil quality and investigate treatments of gypsum rates ranging from 0.0 to 6.5 Mg ha<sup>-1</sup>. The other experiments were conducted in acid soil (experiment III) and in a soil with abrupt chemical quality transition (experiment IV). The experiment III was conducted in a split plot design, with plots consisting of gypsum rates ranging from 0.0 to 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>, and subplots of two lime rates (0.0 and 2.0 Mg ha<sup>-1</sup>). The experiment IV was conducted in a split plot design, with plots consisting of gypsum rates ranging from 0.0 to 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> and subplots of lime rates from 0.0 to 4.8 Mg ha<sup>-1</sup>. In a group of 17 crop-yields investigated during the experimental period 82 % had yield increase to gypsum and lime inputs. The gypsum rate that optimize the grain yield was high (4.7 Mg ha<sup>-1</sup>) and in the same way the maximum technical efficiency of lime was higher than the currently recommended. In addition, there was a positive interaction yield effect between the lime and gypsum inputs. The soil layer that was related to the crop yield was the 0.25-0.40 m in experiment I, 0.00-0.40 m in experiment II and the 0.00-0.25 m in experiment IV. Only in the experiment III, which had acid topsoil, the current diagnostic layer of 0.00-0.10 m presented relation to grain yield. Therefore, the use of a soil layer as 0.00-0.25 m with critical values of 65% of base saturation and maximum of 5 % of Al saturation could improve the current soil correction recommendation. Yet, the formation of a thicker high chemical quality layer is an

efficient strategy to explore the yield potential of modern grain crop cultivars under dystrophic Oxisol.

**Keywords:** base saturation, Al saturation, root zone, grain yield.

## 6.2. RESUMO

### *PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES MODERNAS DE MILHO, TRIGO E SOJA AFETADAS PELO GESSO E CALCÁRIO EM LATOSSOLOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO*

*Cultivares modernas de milho, trigo e soja apresentam ciclo curto e elevada resposta ao aporte de nutrientes. Frequentemente, o sistema de plantio direto (SPD) cria um gradiente de qualidade química do solo através da zona de enraizamento (ZE), resultando em redução da produtividade em condições de estresse hídrico e subsolo ácido. O objetivo desse estudo foi de avaliar o efeito do gesso, aplicado isoladamente ou em combinação com calcário, sobre a produtividade de cultivares utilizadas no estado do Rio Grande do Sul. O estudo consistiu de quatro experimentos conduzidos em Latossolos distróficos sob SPD. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com três repetições. Os experimentos I e II foram realizados em solos que possuíam satisfatória qualidade química do solo e os tratamentos foram doses de gesso que variaram de 0,0 a 6,5 Mg ha<sup>-1</sup>. Os outros experimentos foram conduzidos em solo ácido (experimento III) e em solo com transição abrupta da qualidade química (experimento IV). O experimento III foi conduzido em parcelas subdivididas, as parcelas foram doses de gesso entre 0,0 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> e as subparcelas, duas doses de calcário (0,0 e 2,0 Mg ha<sup>-1</sup>). O experimento IV consistiu de parcelas subdivididas, as parcelas receberam doses de gesso entre 0,0 e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> e as subparcelas, doses de calcário entre 0,0 e 4,8 Mg ha<sup>-1</sup>. Dentre as 17 safras investigadas durante o período experimental, 82% apresentaram aumento de produtividade para as aplicações dos tratamentos. A dose de gesso que otimizou a produtividade foi elevada (4,7 Mg ha<sup>-1</sup>), do mesmo modo a máxima eficiência técnica do calcário foi maior do que a recomendada atualmente. Além disso, houve um efeito positivo na interação entre o calcário e o gesso sobre a produtividade. A camada de solo que esteve relacionada com a produtividade das culturas foi de 0,25-0,40 m no experimento I; 0,00-0,40 m no experimento II e 0,00-0,25 m no experimento IV. Somente no experimento III, que possuía solo ácido, a camada diagnóstica atual de 0,00-0,10 m apresentou relação com a produção de grãos. Portanto, o uso de uma camada de solo de 0,00-0,20 m com valores críticos*

*de 65 % de saturação por bases e no máximo de 5 % de saturação por Al poderia melhorar a recomendação de correção de solos. A formação de uma camada com alta qualidade química é uma estratégia eficiente para explorar o potencial de produtividade de cultivares modernas de grãos em Latossolos distróficos.*

*Palavras-chave: saturação de base, Al saturação, zona de enraizamento, cálcio.*

### **6.3. INTRODUCTION**

Increasing the agricultural production is a world challenge to achieve food security in the 21st century, facing a scenario of increasing population and greater purchasing power (Amundson et al., 2015). The no-tillage system (NTS) has been consolidated as an efficient alternative to erosion control (Derpsch and Friedrich, 2009), water infiltration increase (Machado and Brum, 1978), soil organic matter (SOM) restoration (Amado et al., 2009), in meantime that decrease costs, labor and fuel demanded for grain production in tropical environment.

However, the feasibility of sustain high grain yields under continuous NTS has been recently questioned for diverse reasons related to plant limiting factors (Ogle et al., 2012). This result suggests a need of NTS adaptation/modifications to optimize crop performance required to food production goals. Generally, the improvement of the soil chemical attributes under continuous NTS is restricted to a top shallow layer, and under acid Oxisol's subsoil this feature may compromise the water use efficiency and grain yield (Dalla Nora and Amado, 2013; Bortoluzzi et al., 2014; Caires et al., 2015; Zandoná et al., 2015). The surface or low depth input of fertilizers and amendments (Bortoluzzi et al., 2014), associated with the occurrence of soil compaction and low biological activity, has been identified as main causes for an abrupt chemical quality gradient between surface and subsurface layers of NTS Oxisol's. The low chemical quality of subsoil restrict the plant root system to a shallow layer and cause loss of yields in modern cultivars, under water stress conditions (Blanco-Canqui and Lal, 2008; Caires et al., 2011a,b; Dalla Nora and Amado, 2013; Bortoluzzi et al., 2014; Powlson et al., 2014).

Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) has been recognized, as an alternative for improving the chemical quality attributes of the rooting layer under NTS, especially when in combination with lime input (Rampim et al., 2011; Watts and Dick, 2014; Caires et al., 2015).

In United States, the benefits of gypsum as a nutrient source for plants and as soil conditioner are recognized since colonial times, dating back to the late eighteenth century

(Crocker, 1922). The supply of sulfur ( $S-SO_4^{2-}$ ), an essential secondary macronutrient, play a key role in biological nitrogen fixation in soybean since it is a driver of nitrogenase enzyme functioning (Nunes et al., 2003). Recent studies have indicated that modern cultivars with high yield potential demand more  $S-SO_4^{2-}$  than traditional ones (Broch et al., 2011; Bender et al., 2015). The calcium ( $Ca^{2+}$ ), another nutrient supplied by gypsum, is required at the root tips (Taiz and Zeiger, 2009) and it is demanded in a high quantity for modern cultivars (Bender et al., 2015). As a consequence, the supplement of this nutrient is critical for high grain yield especially at low pH conditions, which is generally found in the subsoil of the Oxisol's (Toma et al., 1999).

In tropical acid soils the  $Ca^{2+}$  is usually supplied by lime, however, the vertical movement of this nutrient in soil profile is limited. On the other hand, gypsum is about 200 times more soluble in water than lime (Cabrera, 2009), this higher solubility favors the  $Ca^{2+}$  movement, which occurs along with the  $S-SO_4^{2-}$  displacement along the soil profile (Chen and Dick, 2011). Therefore, the use of gypsum favors a formation of a ticker layer with high chemical quality increasing the root system depth and deeper water uptake (Dalla Nora et al., 2014a) and N use efficiency (Caires et al., 2015).

In addition to the supplying of  $Ca^{2+}$  and  $S-SO_4^{2-}$ , gypsum acts as a soil conditioner, with positive impacts on chemical and physical attributes, especially in aggregation, soil compaction alleviation, water infiltration rate, erosion control and mitigating the  $Al^{3+}$  toxicity (Shainberg et al., 1989; Rampim and Lana, 2015). The use of gypsum has grown in the United States, under different soil types and crops, because it's multiple benefits (Buckley and Wolkowski, 2014).

Recent studies carried out in Brazilian tropical and subtropical soils have overall reported increases in yield of grain crops due to gypsum input (Caires et al., 2011a, b; Raij, 2010; Alleoni et al., 2005; Dalla Nora and Amado, 2013; Blum et al., 2014; Dalla Nora et al., 2014b; Pauletti et al., 2014; Zandoná et al., 2015). Assessing the long-term effect of gypsum in 11 maize crops, Farina et al. (2000) reported an average increase in yield of  $135 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Linear increase ( $p < 0.05$ ) in wheat yield in response to increasing gypsum rates up to  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  has been reported by Rampim et al. (2011). Raij (2010) reported an increase of  $184 \text{ kg ha}^{-1}$  on soybean yield with a rate of  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum input. Results obtained by Zandoná et al. (2015) indicated increases of 9.3 % in maize yield and 11.4 % in soybean yield with a gypsum input in an Oxisol managed under NTS in Rio Grande do Sul (RS). In addition, they also observed that the yield increase with gypsum combined with lime was higher than the increase with the inputs applied singly, even when the initial condition would not require lime according to the current criteria of CQFS-RS/SC (2004) that is based on the surface soil layer

(0.00-0.10 m) with the following acidity characteristics: pH H<sub>2</sub>O < 5.5; BS < 65% and Al<sup>3+</sup> saturation > 10%. However, results on the input of gypsum combined with lime in SPD in RS are inconclusive.

In the last decade, there was a large adoption of modern high performance cultivars of soybean and maize, with characteristics of short cycle, low height, reduced root system and high input demands. In general, these cultivars are more sensitive to chemical quality, aluminum content, soil compaction and water stress. Therefore, update in lime recommendation maybe required to explore efficiently the new crop yield potential. The objective of the present study was to evaluate the effect of gypsum, applied singly or in combination with lime, on the yield of modern cultivars currently used in the state of RS under NTS.

## **6.4. MATERIALS AND METHODS**

### **6.4.1. Description of the experimental areas**

Four croplands were selected with similar soil type and crop managed under a NTS for long-term in Rio Grande do Sul. Two experiments were implemented in 2009 in Carazinho (Experiment I and II). Experiment I is located at 28°19'S and 52°55'W coordinates, altitude of 595 m, with annual rainfall of 1821 mm and average annual temperature of 16.0°C. Experiment II is located at 28°17'S and 52°47'W coordinates, at an altitude of 617 m and same values of annual rainfall and average temperature of previous field. Two other experiments were implemented in 2011 in São Miguel das Missões (Experiment III) and Tupanciretã (Experiment IV). Experiment III is located at 28°40'S and 54°23'W coordinates, altitude of 265 m with annual rainfall of 1651 mm and average annual temperature of 15.0°C. Experiment IV is located at 29°00'S and 53°94'W coordinates, altitude of 507 m with annual rainfall of 1766 mm and average annual temperature of 17.0°C. In all experiments, the soil was classified as Typic Hapludox (Soil Survey Staff, 2010) with clay texture (Embrapa, 2006). According to Koppen (1938) the climate is classified as humid subtropical (Cfa). The rainfall during the experiment period is shown in Figure 1.

Prior the implantation of the experiments, the fields were managed under a continuous NTS for more than 15 years, receiving lime inputs around 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> with 80% effective CaCO<sub>3</sub> equivalent spaced in intervals of 4 to 5 years. Preceding the experiment establishment, the fields were cultivated with black oats (*Avena strigosa* Schreb), which was chemically managed with glyphosate [N- (phosphonomethyl) glycine] and after gypsum rates were applied manually on the soil surface in August 2009 for the Experiments I and II. For the experiments

III and IV the treatment applications were held in 2011. In Experiment III, the gypsum was applied in August 2011 and the lime in August 2013. In the experiment IV, the combined rates of gypsum and lime were applied concomitantly in August 2011. The crop cycle, fertilizers applications and evaluations carried out in the four experimental areas are shown in Table 1.

The initial chemical characterization was carried out priory the experiment implementation, by the collection of five cores taken randomly in each experimental area in the following depths: 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15; 0.15-0.25; 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m. In Table 2 are shown the soil chemical analysis of the initial characterization according to the methods described in Tedesco et al. (1995).

#### 6.4.2. Experimental Design

The experimental design in all experiments was a randomized block design with three replications. Each plot had an area of 64.0 m<sup>2</sup> with the dimensions of 8.0 x 8.0 m. In experiments I and II, which had the surface layer already corrected, the treatments were the following gypsum rates: 0.0; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0 and 6.5 Mg ha<sup>-1</sup> applied on soil surface. Experiments I and II were selected to test whether modern cultivars respond to inputs even under satisfactory conditions. The experiment III the treatments were: 0.0; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum applied on the soil surface. In April 2013 after 22 months of gypsum input, the main treatments were divided and the subplots were composed by rates of 0.0 and 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> of dolomitic lime. The experiment IV the treatments were a split-plot design with plots composed by gypsum rates of 0.0; 2.0; 4.0 and 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> the subplots ranging of 0.0; 2.4; 3.6 to 4.8 Mg ha<sup>-1</sup> of lime. The gypsum and lime inputs were applied simultaneously on soil surface. The central lime rate (3.6 Mg ha<sup>-1</sup>) was set up in order to achieve 70 % of BS in the layer of 0.00-0.20 m. A central gypsum rate was set up according the Equation 1 reported by Quaggio and Raij (1996). The Equation 1 has been recommended for the application of gypsum in soils of Cerrado region and Central Brazil.

$$GR = \text{clay content} \times 60$$

Equation 1

The agricultural gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) used in the experiments had the composition of 210 g kg<sup>-1</sup> of Ca<sup>+2</sup>, 155 g kg<sup>-1</sup> of S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 0.024 g kg<sup>-1</sup> of F<sup>-</sup> and 9.0 g kg<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. The dolomitic lime had 30% of CaO and 20% of MgO with 80% effective CaCO<sub>3</sub> equivalent.



### 6.4.3. Soybean, wheat and maize cultivars

The cultivars and hybrids selected for this study were the most cropped currently in the RS, they were: *Pioneer 3069* in experiments I and II and *Dekalb 240* in the others for maize (*Zea mays* L.); *Nidera 5909* in experiments I and II and *Coodetec 235RR* in the others for soybean; *Quartzo* in experiments I and II and *BRS Tarumã* in the others for wheat (*Triticum aestivum* L.). The soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivars and maize hybrids used in the experiments were transgenic, with characteristics of short-cycle, low height and high yield potential. The maize was sown at density of 4 seeds m<sup>-1</sup> with rows spaced 0.50 m apart, the soybean at 12.0 seeds m<sup>-1</sup> (inoculated with *Bradyrhizobium japonicum*) with rows spaced 0.50 m apart, and the wheat at 60 seeds m<sup>-1</sup> with rows spaced 0.20 m apart.

### 6.4.4. Description of the main evaluations

In the experiment I, the soil samples were collected at 6, 14, 22, 32, 44 and 56 months after treatment application. In Experiment II, the soil samples were taken at 6, 22, 32, 44 and 56 months after treatment application. In Experiments III and IV, the samples were taken at 15 and 30 months after treatment application. In Experiment III, the soil sampling performed at 30 months recurred after eight months of the lime input in subplots. The soil sampling was composed of three subsample to form a soil sample in the following depths: 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15; 0.15-0.25; 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m by opening manual trenches with dimensions of 0.3 x 0.3 x 0.6 m. The soil samples were collected with a spatula at the front wall of the trench, it was dried and had the roots and plant residues present removed.

The soil chemical determinations were: Al<sup>+3</sup> content extracted with KCl 1 mol L<sup>-1</sup> and titrated with NaOH 0.0125 mol L<sup>-1</sup>, Ca<sup>+2</sup> and Mg<sup>+2</sup> extracted with KCl 1.0 mol L<sup>-1</sup> and determined by atomic absorption spectrophotometry. The K<sup>+</sup> were extracted with Mehlich-I solution and determined by flame photometry. With these attributes, the values of base saturation (BS) and Al saturation were calculated.

Samples of maize, soybean and wheat were manually collected around the soil sampling points to evaluate their yield at physiological maturity. Four linear meters of crops (2 m in each seeding row per subplot) were collected, and the grain masses were corrected for 13 % of moisture.

The relative yields of the grain crops were determined for each experimental units through the equation 1:

$$RY (\%) = \frac{\text{Crop yield in the plot}}{\text{Maximum crop yield in the experiment}} \times 100 \quad (1)$$

The maximum crop yield was found by fit the equation to the yield and rates used in the treatments.

#### 6.4.5. Statistical analysis

The effect of the gypsum rates on the grain yields was assessed by regression using the PROC REG procedure in SAS (Statistical Analysis Systems Institute Inc., 2009). In the experiment IV, when an interaction between rates of gypsum and lime was found, the yield results were assessed using response surface and a binomial function between the wheat and soybean yields and the gypsum and lime rates. The effect on yield by gypsum rates, when significant, was subjected to regression analysis. The effect between the relative yield and the base saturation (BS) and Al saturation in the different soil layers, when significant, was subjected to regression analysis.

### 6.5. RESULTS AND DISCUSSION

#### 6.5.1. Soybean, maize and wheat yield in the control treatment

As the experimental areas had distinct chemical soil quality at begin of the experiment the yields obtained in the control treatments varied similarly to soil quality. The different initial chemical quality in the RZ, including acid soils in whole soil profile (experiment III), soils with only the shallow layer (0.00-0.10 m) amended (experiment IV) and soils with thicker layer (0.00-0.40 m) amended (experiments I and II) (Table 2). The highest maize yield among the control treatments (Figure 2a) was found in the experiment II, which had the best chemical quality (BS > 65 % and Al<sup>3+</sup> saturation close to 0.0%) in the rooting zone (RZ) (Table2). Thus, the maize average yield in the experiment II was 5.9 % higher than in the experiment I.

The highest yields in wheat control treatments (Figure 2b) were found in experiments I and II, which had satisfactory chemical quality in the RZ (Table 2). The wheat average yield in experiments III and IV was similar, however, it was 49 % lower than in experiments I and II (Figure 2b). This result was associated with low chemical quality [BS < 65 % and Al<sup>3+</sup> saturation > 10% (CQFS-RS/SC, 2004)] in the shallow layer (0.00-0.10 m) in experiment III and the abrupt transition between topsoil layer and adjacent layer (0.10-0.25 m) in the experiment IV (Figure 2).

Similar to the maize and wheat crops, the greatest soybean yields were found in the experiments I and II, which had an average of 20.9 % higher than in the experiment III (Figure 2c). The temporal analysis of the grain crop yields in the soils with different chemical quality in the RZ indicated that areas managed with crop rotation and improved chemical quality in a thick layer (experiments I and II) result in higher yields, providing a higher stability over time in relation to experiments with low chemical quality (experiment III) or with improvements only in the topsoil (experiment IV).

### **6.5.2. Crop yield response to gypsum and lime inputs**

Seventeen crop yields were evaluated during the study period, nine of soybean, five of wheat and three of maize, in four experiments (Figure 3). Three (17 %) of these crops had no yield increase in response to the gypsum and lime inputs. The absence of responses of soybean crops in experiment I (2013/14) (Figure 3a), and II (2009/10) and of a wheat crop in experiment II (2013) (Figure 3b) probably was associated with the high and regular precipitation distribution during the cycle of these crops. In some experiments, the increase in soybean yield in response to gypsum input has been dependent on the precipitation regime, usually presenting slight increases or even non-response under high precipitation conditions (Caires et al., 2011a; Rampim and Lana, 2011; Rampim et al., 2015). The discussion of crop yield responses to the inputs was ordered according to the initial soil chemical quality, aiming facilitate the interpretation of the results.

### **6.5.3. Crop responses to gypsum and lime applications in soils with high chemical quality in the RZ**

#### **Experimental area I**

According to the fitted equation for the maize crop in 2009/10 (Figure 3a), the gypsum rate of 5.9 Mg ha<sup>-1</sup> enabled the highest yield (11,247 kg ha<sup>-1</sup>), representing an increase of 8.0 % compared to the control. This result was found despite the high precipitation during the crop cycle (1,249 mm) (Figure 1). The second maize crop (2012/13) in this experimental area had a linear increase in grain yield in response to the gypsum rates, reaching a yield of 10,406 kg ha<sup>-1</sup> with the maximum rate of gypsum input (6.5 Mg ha<sup>-1</sup>), representing an increase of 8,0 % compared to control even if the control treatments already presented high maize yield (10,700 kg ha<sup>-1</sup> in 2009/10) and 9,837 kg ha<sup>-1</sup> in 2012/13). These results suggest that to explore the modern maize hybrids potential there is a need of gypsum input even in soils with satisfactory chemical soil quality in RZ (Table 2) and under favorable precipitation regime (Figure 1).

Increases in maize yields with gypsum rates up to 12.0 Mg ha<sup>-1</sup> were reported by Pauletti et al. (2014) even under normal precipitation. An increase in nitrogen use efficiency (NUE) associate to the gypsum input, as reported by Caires et al. (2015) and Torbert and Watts (2014), may be an explanation for the maize yield increase, since the root system deepening favors the nitrate uptake in subsurface layers, in years with high precipitation. In the meta-analysis study Pittelkow et al. (2015) reported that overall no-till can decrease corn yield up 7.6 % and in tropical regions this value could be even doubled. In part this result is attributed to insufficient plant N supply and other nutrient deficiencies under NTS in relation to conventional tillage (Rusinamhodzi et al., 2011; Ogle et al., 2012). Therefore, it is critical for enhance the NTS performance in tropical soils develop strategies that allow increase in NUE as gypsum input.

For wheat crop (2013), based on the fitted equation, the highest yield was 3,288 kg ha<sup>-1</sup>, with a gypsum rate of 6.4 Mg ha<sup>-1</sup>, representing an increase of 7.8 % compared to the control (Figure 3a). Similar results were observed by Caires et al. (2002), who found an increase in wheat yield with gypsum rates of up to 9.0 Mg ha<sup>-1</sup>, even in a year with no water stress.

For soybean, an increase in grain yield was observed in response to gypsum input in two out the three years evaluated (Figure 3a). In 2010/11 soybean had a yield increase of 8.8 % (4,733 kg ha<sup>-1</sup>) with the gypsum rate of 5.7 Mg ha<sup>-1</sup> compared to the control, according to the fitted equation. This yield was the highest in the whole pool of four experimental areas being approximately 82.0 % higher than the RS state average. This result confirms the high yield potential of the transgenic genetic material used ( $\approx 5.0$  Mg ha<sup>-1</sup>) and excellent crop management adopted by the farmer selected (reference farmers with high technology input). In recent Brazilian soybean yield contest, aiming soybean yields (>6 Mg ha<sup>-1</sup>), the use of gypsum was frequently reported as one of the management strategies used to build up a thicker layer enriched in Ca<sup>2+</sup>, with high BS and free of Al<sup>3+</sup> (CESB, 2015). In the second soybean crop year (2011/12) the relative yield (19.0 %) was even higher than in the previous year, with a gypsum rate of 6.2 Mg ha<sup>-1</sup>, compared to the control, reaching a yield of 3,678 kg ha<sup>-1</sup> (22 % lower than the first year). This higher relative increase in the second soybean year was related with the lower precipitation during the crop cycle (401 mm) compared to precipitation observed in the previous crop season (808 mm) (Figure 1). Under water stress the plants invest more photoassimilates in roots to use water stored in deeper soil layers (Shainberg et al., 1989). Thus, the increase in Ca<sup>2+</sup> content and the lower activity of Al<sup>3+</sup> in the RZ in treatments with gypsum input, probably enhanced root development mitigating the water stress. Increases in soybean yield by applying gypsum rates in an Oxisol of Parana State have been reported by Pauletti et al. (2014). In a study with modern soybean cultivars Bender et al. (2015) reported that the total

Ca<sup>2+</sup> uptake was as high as 120 kg ha<sup>-1</sup> for a yield of 3,500 kg ha<sup>-1</sup>. The quantity of Ca<sup>2+</sup> demanded by modern soybean is just overcome by the quantity of N and K uptake. In addition, the quantity of S required by modern soybean was close to 20 kg ha<sup>-1</sup> (Bender et al., 2015). These results support the high soybean yield response to gypsum input.

### **Experimental area II**

The first maize crop (2010/11) in this experimental area had a quadratic yield response to the gypsum rates, reaching an increase of 24.0 % (2,413 kg ha<sup>-1</sup>) compared to the control. The gypsum rate of 5.6 Mg ha<sup>-1</sup> enabled a grain yield of 12,360 kg ha<sup>-1</sup> (Figure 3b), based on the fitted equation. This maize yield was the highest among the experimental areas and it was 2.6-fold higher than RS state average. Thus, the maize yield was positively affected by gypsum input, even when the control treatment reaching a high yield (≈10 Mg ha<sup>-1</sup>), as a result of the satisfactory initial chemical quality of the RZ (Table 2). Similar relative maize yield increment was reported by Fageria (2001), who observed an increase of 23.0 % in relation to the control. For wheat (2013) there was no significant increase in yield by the gypsum input (Figure 3b).

In the first soybean (2009/10) there was no significant increase in the application of treatments (Figure 3b). For second soybean (2011/12) a yield increase of 13.0 % was observed in response to a gypsum rate of 5.3 Mg ha<sup>-1</sup>, reaching a yield of 2,744 kg ha<sup>-1</sup>, according to the fitted equation. The high relative increase in soybean yield was probably related to the low precipitation during the crop cycle (401 mm) (Figure 1), which resulted in an average yield lower than the other years in the same experimental area (Figure 3b). In the third soybean (2012/13) there was a linear yield increase to the gypsum rates, with 7.8% of relative yield increase for the highest gypsum rate (6.5 Mg ha<sup>-1</sup>) compared the control, reaching 3,764 kg ha<sup>-1</sup>. In addition, the maximum effect on soybean yield was observed after 44 months of gypsum application.

#### **6.5.4. Crop responses to gypsum and lime applications in soils with low chemical quality or abrupt quality transitions in the RZ**

##### **Experimental area III**

The soil of this experiment differed from the others by presenting high acidity and low BS since the upper layers (0.00-0.05 and 0.05-0.10 m), condition that was even worst in the subsurface layers (0.015-0.25 and 0.25-0.40 m) (Table 2). Furthermore, the low Ca<sup>2+</sup> saturation in the layer 0.25-0.40 m indicated that this cropland would have the highest probability of response to gypsum input. In fact, as expected, yield increases in response to gypsum rates, applied singly or in combination with lime were observed in all crop types and years evaluated

(Figure 3c). For wheat the two years evaluated had a quadratic response to the gypsum input. In the first wheat (2012) (Figure 3c), the gypsum rate that enable the highest yield (2,448 kg ha<sup>-1</sup>) was 4.5 Mg ha<sup>-1</sup>, with a yield increase of 14.0 % in relation to control treatment, according to the fitted equation.

The second year of wheat (2013), after the plots subdivision for lime input, the yield of 2,060 kg ha<sup>-1</sup> at a gypsum rate of 4.9 Mg ha<sup>-1</sup> applied singly, representing an increase of 28.0 % compared to the control. The gypsum in combination with lime result in the maximum yield of 2,301 kg ha<sup>-1</sup> with the gypsum rate of 4.9 Mg ha<sup>-1</sup> combined with 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> of lime, resulting an increase of 25.5 % compared to the control. This gypsum + lime was 12.0 % higher than the plot with only gypsum input at same rate (4.9 Mg ha<sup>-1</sup>). This result reinforces the interaction effect provided by the combination of these inputs. On the other hand, the lime rate of 2.0 Mg ha<sup>-1</sup>, applied singly, enabled an increase of 15.0 % compared to control. The yield found with lime applied singly (2.0 Mg ha<sup>-1</sup>) was equivalent to the yield found with 2.5 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum applied singly. The yield (2,060 kg ha<sup>-1</sup>) achieved with a gypsum rate of 4.9 Mg ha<sup>-1</sup>, applied singly, was also achieved with 1.4 Mg ha<sup>-1</sup> in combination with 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> of lime that is more economic (Figure 3c).

The first soybean (2012/13) had a linear yield response to the gypsum rates, with maximum yield (4,007 kg ha<sup>-1</sup>) achieved with the rate of 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>, representing an increase of 12.0 % compared to the control (Figure 3c). The higher response of modern soybean cultivars to S (Broch et al., 2011) and to Ca<sup>2+</sup> (Bender et al., 2015) help to explain the result obtained.

The second soybean (2013/14) show a quadratic yield response to the gypsum input (Figure 3c). The maximum yield (2,574 kg ha<sup>-1</sup>) was achieved with the rate of 4.0 Mg ha<sup>-1</sup>, representing an increase of 36.5 % compared to the control. The gypsum + lime had highest yield (2,655 kg ha<sup>-1</sup>) with the rates of 4.3 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum and 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> of lime, an increase of 18.2 % compared to the control. The lime applied singly increased the soybean yield by 19.0 % compared to the control. The response to the lime was expected considering the low chemical quality at begin of the experiment (Table 2). According to the fitted equation, the combination of 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> of lime with 2.3 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum reached the experiment maximum yield (2,574 kg ha<sup>-1</sup>), which could also be obtained with 4.0 Mg ha<sup>-1</sup> gypsum applied singly. In addition, the lime + gypsum response curve was higher than the curve of gypsum applied singly. Combination of gypsum with lime, especially in acid soils, presents positive interaction effect in relation to the inputs applied singly (Raij, 2010). Similar results were reported by Caires et al. (2004, 2011a), Souza et al. (2012), Dalla Nora et al. (2014a) and Pauletti et al. (2014).

#### Experimental area IV

The experimental design of this site is a factorial  $4 \times 4$ , thus enabling further assessments of the interaction effect of gypsum and lime inputs (Figure 3d). Interactions ( $p < 0.01$ ) were observed between the lime and gypsum rates and the soybean and wheat yields. According to the fitted binomial equation, for the first wheat (2012) the maximum yield was  $2,454 \text{ kg ha}^{-1}$  obtained with the combination of  $4.7 \text{ Mg ha}^{-1}$  of lime with  $4.9 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum (Figure 3d), representing an increase of 18.0 % compared to the control. The gypsum applied singly had maximum wheat yield of  $2,149 \text{ kg ha}^{-1}$  with the rate  $4.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ , representing an increase of 7.2 % compared to the control. While the lime applied singly had maximum yield of  $2,251 \text{ kg ha}^{-1}$  with the rate  $4.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ , an increase of 12.2 % compared to the control. Therefore the yield response to lime was 4.7 % higher than of the gypsum, however, the rate for maximum yield for both inputs was similar.

The first soybean (2012/13) (Figure 3d) had maximum yield of  $3,350 \text{ kg ha}^{-1}$  with  $4.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of lime combined with  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum, resulting in a yield increase of 15.7 % compared to control, according to the fitted binomial equation. The maximum yield with gypsum, applied singly, was  $3,146 \text{ kg ha}^{-1}$  with the rate  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , representing an increase of 8.7 % compared to the control. While the lime applied singly had maximum yield of  $3,326 \text{ kg ha}^{-1}$  with the rate  $4.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , representing an increase of 14.9 % compared to the control. This yield response to lime applied singly was 5.7 % higher than that found with gypsum singly, even with a gypsum rate 50 % greater than the lime. The result of higher soybean and wheat yield response for lime in relation to gypsum in this experimental area, reinforce that under the presence of acid subsoil only the amended of a topsoil (0.00-0.10 m) is not enough to support high yields. In addition, this soil would not require lime input based on the current recommendation criteria of CQFS-RS/SC (2004) ( $\text{pH H}_2\text{O} < 5.5$ ;  $\text{BS} < 65\%$  and  $\text{Al}^{+3}$  saturation  $> 10\%$  for the layer 0.00-0.10 m), although it had yield response until  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  for soybean and  $4.7 \text{ Mg ha}^{-1}$  for wheat.

These results suggest that the high performance transgenic soybean and modern wheat cultivars are more responsive to lime than the traditional ones, which were used to get the response curves to this input. The characteristics of higher yield potential, short cycle, lower soil acidity tolerance and less developed root system were among the factors that contribute to this result. Similarly, the response of these genetic materials to gypsum should be further evaluated since this input is not recommended for South Brazilian soils. The interaction effect between the gypsum and lime found in this experiment was similar to those noted in the experiment III and to the results reported previously by Rajj (2010) and Caires (2013). The

results of this experimental area highlight the need of amendment a layer deeper than the topsoil aiming explore the yield potential of modern cultivars in Oxisols.

#### **6.5.5. Accumulated production of grain crops affected by gypsum and lime input**

Crop rotation is preconized management to NTS aiming to sustain high crop yields (Pittelkow et al., 2015). In addition, lime and gypsum inputs have important residual effect. Thus, analyze the cumulative grain production over time in the same site would be required to accurately assess the gypsum and lime crop impacts.

The accumulated production in all experimental areas presented quadratic yield responses ( $p < 0.05$  for the experiments I, II and IV and  $p < 0.01$  for experiment III) (Table 3). For the experiment I the maximum cumulative production of  $36,826 \text{ kg ha}^{-1}$  was obtained with a gypsum rate of  $5.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  during a 54 months experimental period (six crop yields evaluated). This rate had an accumulate production increase of  $7.0 \%$  ( $2,223 \text{ kg ha}^{-1}$ ) compared to the control, according to fitted equation. The experiment II had maximum accumulated production of  $25626 \text{ kg ha}^{-1}$  with a gypsum rate of  $4.6 \text{ Mg ha}^{-1}$  throughout the 54-months experimental period (five crop yield evaluated), representing an increase of  $9.5 \%$  ( $2,230 \text{ kg ha}^{-1}$ ) compared to the control, according to fitted equation. The grain production increase due gypsum was near  $495 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  for both experiments. For the experiment III the maximum accumulated yield was  $11,225 \text{ kg ha}^{-1}$  with a gypsum rate of  $3.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ , representing an increase of  $12.0 \%$  ( $1,158 \text{ kg ha}^{-1}$ ) compared to control (four crop yields evaluated). The grain production increase ( $386 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) obtained with gypsum input in this acid soil is expressive, since this input is not an acidity corrector. According to Farina et al. (2000) increases of  $135 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (average of 10 crop yields) with application of gypsum. Linear and significant increases in maize yields ( $p < 0.01$ ) 10 years after the application of gypsum rates ranging from  $0.0$  to  $9.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  in an Oxisol managed under NTS has reported by Caires et al. (2011b).

The maximum accumulated production in the experiment IV was  $5,786 \text{ kg ha}^{-1}$  with the combination of  $4.2 \text{ Mg ha}^{-1}$  of lime and  $5.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum, representing an increase of  $18.0 \%$  ( $886 \text{ kg ha}^{-1}$ ) compared to control (Table 3). This relative production increase was the higher observed in the four experimental areas. The annual yield increase was  $443 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (two crop yields). The gypsum applied singly had maximum production of  $5,283 \text{ kg ha}^{-1}$  with the rate of  $5.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ , representing an increase of  $7.0 \%$  ( $383 \text{ kg ha}^{-1}$ ) compared to the control. The annual yield increase was  $192 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . While, the treatments with singly lime rate of  $4.2 \text{ Mg ha}^{-1}$  had an increase of  $12.0 \%$  ( $669 \text{ kg ha}^{-1}$ ) compared to the control. The annual yield increase was  $334 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . This result reinforces that there is a need to alleviate the abrupt



transition of chemical quality in the RZ in order to stabilize the crop yield. The interaction between the lime at  $3.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  and the gypsum at  $2.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  (rates often used by farmers empirically) would achieve a cumulative grain production of  $5,690 \text{ kg ha}^{-1}$  (97.0 % from the maximum grain production in the experiment), representing an increase of 14.0 % ( $790 \text{ kg ha}^{-1}$ ) compared to the control, according to the fitted binomial equation. The annual yield increase was  $395 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  suggesting that correctness of farmer's strategy.

The chemical improvement of the RZ had most pronounced effects of increasing crop yield in the experiments III and IV (Table 3), as expected, once they had the highest chemical restrictions in the subsurface (Table 2). These results reinforce the importance of chemistry amendment in the subsoil layers of Oxisols that allows the water and mobile nutrients uptake through the roots (Coleman and Thomas, 1967; Reeve and Sumner, 1972; Shainberg et al., 1989; Sumner, 1995; Farina et al., 2000; Caires et al., 2011b; Dalla Nora et al., 2014a).

#### **6.5.6. Relative yield of grain crops affected by gypsum rates**

In order to identify the yield response of each crop singly (Figure 4 a, b and c) and all crops together (Figure 4 d) to gypsum input, the experimental areas were analyzed singly and the yield of each treatment were relativized to the highest yield obtained. Thus, a quadratic relative yield response ( $p < 0.05$ ) to the gypsum rates was found (Figure 4). This result is relevant considering that the chemical quality of the experimental areas at implementation was very different.

The soybean crop had the maximum relative yield (MRY) of 98.8 % with the gypsum rate of  $4.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ , while the control treatment reached 92.2 % (Figure 4a). The wheat crop also had MRY of 98.8 % with gypsum rate of  $4.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , while the control treatment reached 90.1 % according to the fitted equation (Figure 4b). The maize crop had the MRY of 99.5 % with gypsum rate of  $5.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , while the control treatment reached 91.3 % (Figure 4c). Therefore, the maize (8.2 %) and wheat (8.7 %) crops had a higher increase in relative yield compared to control and the soybean crop had the lowest (6.6 %). The higher gypsum response of maize and wheat are probably due to the fact that the Poaceae present roots with cation exchange capacity (CEC) lower than legumes. Thus, maize and wheat plants present root with CEC between 100 and 200  $\text{mmol (+) kg}^{-1}$  of dry matter of roots, while the soybean has root CEC between 400 and 800  $\text{mmol (+) kg}^{-1}$  (Fernandes and Souza, 2006). Roots with high CEC accumulate bivalent ions, different from the roots with low CEC, which uptake more efficiently monovalent ions (Broyer and Stout, 1959). Thus, maize and wheat are less efficient than soybean in uptake  $\text{Ca}^{2+}$  from the soil solution, justifying the higher response to gypsum (Caires

et al., 2004). Another possible explanation for these results is the improvement in NUE for wheat and maize crops associated with the root system deepening.

In the joint analysis of the crop types (Figure 4c), the gypsum rate of 4.7 Mg ha<sup>-1</sup> presented the maximum relative yield of 98.8 %, while the control reached 91.4 %. Similar results that showed the positive effect of gypsum in increasing grain crop yields were reported in several studies (Farina et al., 2000; Caires et al., 2004, 2005; Caires, 2013; Souza et al., 2012; Dalla Nora and Amado, 2013; Pauletti et al., 2014). Considering the regional average cost of 1.0 Mg of gypsum as US\$ 48.54 and the average value of 1.0 kg of soybean as US\$ 0.345 would be needed 661.0 kg of soybean to equal the expenses of the rate that reached the MRV (4.7 Mg ha<sup>-1</sup>). In this study the soybean crops of 2010/11 and 2011/12 in Experiment I accumulated 981 kg ha<sup>-1</sup> for the rate that reached the maximum productivity in relation to the control. Thus, despite the high initial investment with gypsum input, the first harvests would already achieve positive economic results. These results are even more evident in the described experiments where the residual effect of gypsum was verified in the long term.

#### **6.5.7. Relationships between soil layer and crop yield and its critical chemical attributes**

The figure 5 shows significant relationships ( $p < 0.05$  and  $p < 0.01$ ) between the accumulated relative yield of soybean, maize and wheat for each experimental area and the soil layer and its critical chemical attributes. The BS and Al<sup>3+</sup> saturation attributes for each soil layer and experimental area shown in this figure were the ones that best explained the crop yields.

In the experiment I (Figure 5a) a positive linear relationship between the relative yield and the BS ( $p < 0.01$ ) and a negative linear relationship with the Al saturation ( $p < 0.01$ ) was found in the layer 0.25-0.40 m. In this experimental area this soil layer had a decrease in BS and an increase in Al<sup>3+</sup> saturation in relation to adjacent toplayer (Table 2). Thus, the major chemical impediment to the root system in this site occurred bellow of the 0.25 m depth. The maximum cumulative relative yield had critical values of BS and Al saturation of approximately 60.0 % and 3.0 %, respectively in the layer 0.25-0.40 m. Similar results were found by Dalla Nora and Amado (2013) who reported maximum yield of maize and soybean, in two Oxisols in RS, when the Al saturation decreased below 10.0 % and BS increased to values greater than 50.0 % at a depth of 0.25-0.40 m.

Even, the soil of the experiment II had a low Al content in RZ (Table 2), it presented a positive quadratic relationship between the relative yield and the BS ( $p < 0.01$ ) and a negative linear relationship with the Al saturation ( $p < 0.01$ ) in the layer 0.00-0.40 m (averages between

the layers of 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15; 0.15-0.25 and 0.25-0.40) (Figure 5b). Thus, the maximum relative yield was found when the BS was close to 70 % and the Al saturation was near to zero. This result indicates that was necessary to amend a thicker layer of the soil to achieve high yields for modern cultivars under NTS in dystrophic Oxisols.

The soil of the experiment III presented a positive and linear relationship between the relative yield and the BS ( $p < 0.01$ ) and a negative linear relationship with Al saturation ( $p < 0.01$ ) in the layer 0.00-0.10 m (averages between the layers of 0.00-0.05 and 0.05-0.10) (Figure 5c). The highest yields in this experiment were achieved with BS of about 57.0 % and Al saturation of 5.5 %, and because the linear effect, the values that would maximize yield were not found.

The soil of the experiment IV (Figure 5d) presented a positive quadratic effect ( $p < 0.01$ ) between the relative yield and the BS, and negative linear effect ( $p < 0.05$ ) with Al saturation in the layer 0.00-0.25 m (averages between the layers of 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15 and 0.15-0.25). The BS and Al saturation that enable the maximum relative yield were of about 63 % and 5 %, respectively, in that layer.

Based on the results in the present study, to extend the BS content of 65 %, currently proposed for the layer 0.00-0.10 m, to the layer 0.00-0.25 m, and to decrease the Al saturation from 10 % to 5 %, could represent an important improvement in the criteria used for lime requirement for modern grain cultivars under NTS in RS State. Evaluating soybean and maize crops in an Oxisol under NTS in Paraná State, Vieira et al. (2013) observed that the critical BS content of 60 % in the layer 0.00-0.20 m enabled the maximum economic return.

The critical BS saturation suggested in this study is coherent with those reported by Raij et al. (1997), for the state of São Paulo, and Nicolodi et al. (2008), for the state of RS, in which the authors suggested a BS of 60 % in the layer 0.00-0.20 m for NTS. Studying five years of soybean, maize and wheat crops in an Oxisol of Parana, Caires et al. (1999) reported that the maximum economic return was found when the BS was 65 % in the layer 0.00-0.20 m. In other study Caires et al. (2005) observed that by extending the return period to 10 years, the BS would be as high as 70 %.

## 6.6. CONCLUSIONS

The soybean, wheat and maize in 83 % of seventeen crop yields in four experiments investigated were positively affected by the gypsum, applied singly or in combination with lime, in Oxisols. The positive effect of gypsum in increase grain yield was enhanced when combined with lime with higher impact in years with water stress.

In general, there was a positive yield response to lime input even in soils with satisfactory chemical quality in topsoil, indicating that the modern cultivars are more responsive to lime and less tolerant to aluminum than the traditional ones. The yield response to gypsum also was high, markedly under poor subsoil chemical quality. The gypsum rate that optimizes the crop yield was 4.7 Mg ha<sup>-1</sup> for soybeans, 4.5 Mg ha<sup>-1</sup> for wheat and 5.5 Mg ha<sup>-1</sup> for corn. There was a positive interactive effect between gypsum and lime.

The amendment of a thicker layer in the rooting zone in NTS is needed to maximize the yield of modern grain cultivars. The diagnostic layer of 0.00-0.25 m with the critical value of 65% of base saturation and maximum of 5 % of Al saturation should be considered as critical for no-till Oxisol. Furthermore, in soils with the corrected surface layer, a thicker soil profile (0.00-0.40 m) or a deeper layer (0.25-0.40 m) should be improved to increase yield.

## 6.7. REFERENCES

- Alleoni LRF, Cambri MA, Caires EF. Chemical attributes of a cerrado Oxisol under no-tillage as affected by lime application methods and doses. *R Bras Ci Solo*. 2005;29:923-34.
- Amado TJC, Pes LZ, Lemainski CL, Schenato RB. Chemical and physical attributes of Oxisols and their relation with irrigated corn and common bean yields. *R Bras Ci Solo*. 2009;33:831-43.
- Amundson R, Berhe AA, Hopmans JW, Olson C, Sztein AE, Sparks DL. Soil and human security in the 21st century. *Soil Sci*. 2015;348:647-53.
- Bender RR, Haegele JH, Frederick E. Below nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. *Agron J*. 2015;107:563-73.
- Blanco-Canqui H, Lal R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Sci Soc Am J*. 2008;72:693-701.
- Blum BS, Garbuio FJ, Joris HAW, Caires EF. Assessing available soil sulphur from Phosphogypsum applications in a no-till Cropping system. *Exp Agric*. 2014;50:515-32.
- Bortoluzzi EC, Parize GL, Korchagin J, Silva VR, Rheinheimer DS, Kaminski J. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. *R Bras Ci Solo*. 2014;38:262-71.
- Broch DL, Pavinato PC, Possenti JC, Martin TN, Del Quiqui EM. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. *R Ci Agron*. 2011;42:791-6.
- Broyer TC, Stout PR. The macronutrient elements. *Annl Rev Plant Physiol*. 1959;10:277-300.

- Buckley ME, Wolkowski RP. In-season effect of flue gas desulfurization gypsum on soil physical properties. *J Environ Qual*. 2014;43:322-7.
- Cabrera RAD. Mitos e fatos sobre a gessagem. Cordeirópolis: Citricultura Atual; 2009.
- Caires EF. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. LOCAL: International Plant Nutrition Institute; 2013. (Informações Agronômicas, 141).
- Caires EF, Kusman MT, Barth G, Garbuio FJ, Padilha JM. Changes in soil chemical properties and corn response to lime and gypsum applications. *R Bras Ci Solo*. 2004;28:125-36.
- Caires EF, Feldhaus IC, Barth G, Garbuio FJ. Lime and gypsum application on the wheat crop. *Sci Agric*. 2002;59:357-64.
- Caires EF, Haliski A, Bini AR, Scharr DA. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. *Eur J Agron*. 2015;66:41-53.
- Caires EF, Fonseca AF, Mendes J, Chueiri WA, Madruga EF. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície em sistema de plantio direto. *R Bras Ci Solo*. 1999;23:315-27.
- Caires EF, Alleoni LRF, Cambri MA, Barth G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. *Agron J*. 2005;97:791-8.
- Caires EF, Maschietto EHG, Garbuio FJ, Churka S, Joris HAW. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. *Sci Agric*. 2011b;68:209-16.
- Caires EF, Joris HAW, 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 Manage*. 2011a;27:45-53.
- Comitê Estratégico Soja Brasil - CESB. Desafio da Soja: Resultados. 2015. [Acesso em: 27 março 2015]. Disponível em: <http://www.cesbrasil.org.br/Resultados.aspx>.
- Chen L, Dick WA. Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines. The Ohio State University Extension, Columbus, OH; 2011. [Acesso em: 27 março 2015]. Disponível em: <http://ohioline.osu.edu/b945/index.html>.
- Coleman NT, Thomas GW. The basic chemistry of soil acidity. In: Pearson RW, Adams F, editors. Soil acidity and liming. LOCAL: American Society of Agronomy; 1967. Pt. 2, p.1-41.
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFS-RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10ª.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul/UFRGS; 2004.
- Crocker W. History of the use of agricultural gypsum. Chicago, IL: Gypsum Industries Association; 1922.

- Dalla Nora D, Amado TJC. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. *Agron J*. 2013;105:1393-403.
- Dalla Nora D, Amado TJC, Gruhn EM, Mazuco ACB. Formação de um perfil de enraizamento profundo e a estabilidade da produtividade de culturas de grãos sob Sistema Plantio Direto. *R Plantio Direto*. 2014b;139:1-11.
- Dalla Nora D, Amado TJC, Bortolotto RP, Ferreira AO, Reichard K, Santi AL. Subsoil chemical amelioration and crop yields under continuous long-term no-till in a subtropical Oxisol. *Afric J Agric Res*. 2014a;9:3338-49.
- Derpsch R, Friedrich T. Global overview of conservation agriculture adoption. In: *Proceedings of 4<sup>th</sup> World Congress on Conservation Agriculture; 2009; New Delhi*. New Delhi: Lead Paper; 2009. p.429-38.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 2<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS; 2006.
- Fageria NK. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. *Pesq Agropec Bras*. 2001;36:1419-24.
- Farina MPW, Channon P, Thibaud GR. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Long-term growth effects. *Soil Sci Soc Am J*. 2000;64:646-51.
- Fernandes MS, Souza SR. Absorção de nutrientes. In: Fernandes MS, editor. *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa, MG; Soc Bras Ci Solo. 2006. p.115-53.
- Köppen WP. *Grundriss der Klimakunde*. Berlin: Walter de Gruyter; 1938.
- Machado JA, Brum ACR. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. *R Bras Ci Solo*. 1978;2:81-4.
- Mengel K, Kirkby EA. *Principles of Plant Nutrition*. 4th.ed. Switzerland: International Potash Institute; 1987.
- Nicolodi M, Anghinoni I, Gianello C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:237-47.
- Nogara Neto F, Roloff G, Dieckow J, Motta ACV. Atributos de solo e cultura especialmente distribuídos relacionados ao rendimento do milho. *R Bras Ci Solo*. 2011;35:1025-36.
- Nunes FS, Raimondi AC, Niedwieski AC. Fixação de nitrogênio: estrutura, função e modelagem bioinorgânica das nitrogenases. *Quím Nova*. 2003;26:872-9.
- Ogle SM, Swan A, Paustian K. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. *Agric Ecosyst Environ*. 2012;149:37-49.
- Pauletti V, Pierri L, Ranzan T, Barth G, Motta ACV. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. *R Bras Ci Solo*. 2014;38:495-505.

- Pittelkow CM, Liang X, Linquist BA, Van Groenigen KJ, Lee J, Lundy ME, Van Gestel N, Six J, Venterea RT, van Kessel C. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*. 2015;517:365-8.
- Powlson DS, Stirling CM, Jat ML, Gerard BG, Palm CA, Sanchez PA, Cassman KG, Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nat Clim Change*. 2014;4:678-83.
- Quaggio JA, Raij Bvan. 1996. Correção da acidez do solo. In: Raij Bvan, Cantarella H, Quaggio, JA, Furlani AMC, editors. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, SP, Brazil; 1996. p.14-19.
- Raij Bvan. Gesso na agricultura. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. São Paulo: IPNI; 2010. (Informações Agronômicas, 122).
- Raij Bvan, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2<sup>a</sup>.ed. Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC; 1997. (Boletim Técnico, 100).
- Rampim L, Lana MC. Ion mobility and base saturation after gypsum application in continuous soybean-wheat cropping system under no-till. *Aust J Crop Sci*. 2015;9:468-76.
- Rampim L, Lana MC, Frandoloso JF, Fontaniva S. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. *R Bras Ci Solo*. 2011;35:1687-98.
- Reeve NG, Sumner ME. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface applied amendments. *Agrochemophysica*. 1972;4:1-6.
- Rusinamhodzi L, Corbeels M, vanWijk M, Rufinio MC, Nyamangara J, Giller KE. A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture practices on maize yields under rain-fed conditions. *Agron Sustain Dev*. 2011;31:657-73.
- Shainberg I, Sumner ME, Miller WP, Farina MPW, Pavan MA, Fey MV. Use of gypsum on soils. *Adv Soil Sci*. 1989;9:1-111.
- Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy*. Natural Resources Conservation Service. 11th ed. Washington, DC; 2010.
- Souza FG, Junior EJR, Fietz CR, Bergamin AC, Rosa YBCJ, Zeviani WM. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. *Semina: Ci Agrár*. 2012;33:1717-32.
- Statistical Analysis Systems Institute Inc. - SAS. *SAS/Sat: User's Guide: version 9.2*. Cary; 2009.

- Sumner ME. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: Jayawardane NS, Stewart BA, editors. Subsoil management techniques. Athens: Lewis Publishers; 1995. p.147-85.
- Taiz L, Zeiger E. Fisiologia vegetal. 4ª.ed. Porto Alegre: Artmed; 2009.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2ª.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995. (Boletim Técnico, 5).
- Toma M, Sumner ME, Weeks G, Saigusa M. Long-term effects of gypsum on crop yield and subsoil chemical properties. *Soil Sci Soc Am J.* 1999;63:891-5.
- Torbert HA, Watts DB. Impact of flue gas desulfurization gypsum application on water quality in a coastal plain soil. *J Environ Qual.* 2014;43:273-80.
- Vieira RCB. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em Latossolos sob plantio direto no centro-sul do Paraná. *R Bras Ci Solo.* 2013;37:188-98.
- Watts DB, Dick WA. Sustainable Uses of FGD Gypsum in Agricultural Systems: Introduction. *J Environ Qual.* 2014;43:246-52.
- Zandoná RR, Beutler NA, Burg GM, Barreto CF, Schmidt MR. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. *Pesq Agropec Trop.* 2015;45:128-37.



**Table 1: Crop sequence cultivated in Experiments I, II, III and IV, besides the crop cycle, fertilizer used and the time of evaluation of productivity.**

<b>Experiment I</b>			
<b>Crops</b>	<b>Cycle</b>	<b>Fertilizing</b>	<b>Yield Evaluation</b>
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2009	Without fertilizing	Experiment implementation
		85.5 kg ha <sup>-1</sup> of N (9 kg ha <sup>-1</sup> at seeding and 76.5 kg ha <sup>-1</sup> in topdress), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O; the source of N was urea, [CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ] (45% N)	
<b>Corn</b>	Sept. 2009/Feb. 2010	11.5 of N, 57.5 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 57.5 of K <sub>2</sub> O (formulated fertilization N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O); 20.25 kg ha <sup>-1</sup> of N in topdress (urea)	Evaluation: Feb. 2010
<b>Wheat</b>	July to Nov. 2010		It was not harvested due to frost at flowering
<b>Soybean</b>	Nov. 2010/Apr. 2011	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Apr. 2011
<b>Black oats</b>	May to Oct. 2011	Without fertilization	Cover crop
<b>Soybean</b>	Nov. 2011/Apr. 2012	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Feb. 2012
<b>Black oats</b>	May to Aug. 2012	Without fertilization	Cover crop
		85.5 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea) (9 kg ha <sup>-1</sup> at seeding and 76.5 kg ha <sup>-1</sup> in topdress), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O	
<b>Corn</b>	Sept. 2012/Feb. 2013	11 of N, 55 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 55 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 18 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	Evaluation: Feb. 2012
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2013		Evaluation: Nov. 2013
<b>Soybean</b>	Nov. 2013/Mar. 2014	4.4 of N, 44 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 44 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2014
<b>Experiment II</b>			
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2009	Without fertilizing	Experiment implementation
<b>Soybean</b>	Nov. 2009/Apr. 2010	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Apr. 2010
<b>Oats/Radish</b>	May to Aug. 2010	Without fertilization	Cover crop
		85.5 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea) (9 kg ha <sup>-1</sup> at seeding and 76.5 kg ha <sup>-1</sup> in topdress), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O	
<b>Corn</b>	Out. 2010/Feb. 2011	Without fertilization	Evaluation: Feb. 2011
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2011	Without fertilization	Cover crop
<b>Soybean</b>	Nov. 2011/Mar. 2012	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2012
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2012	Without fertilization	Cover crop
<b>Soybean</b>	Nov. 2012/Mar. 2013	4.8 of N, 48 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 48 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2013
		11 of N, 55 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 55 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 18 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2010		Evaluation: Nov. 2013
			It was not evaluated by harvest problems
<b>Soybean</b>	Nov. 2013/Mar. 2014	4.4 of N, 44 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 44 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	
<b>Experiment III</b>			
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2011	Without fertilizing	Experiment implementation
			The evaluations had not been initiated.
<b>Soybean</b>	Nov. 2011/Mar. 2012	4.2 of N, 42 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 42 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2012	10.5 of N, 52.5 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 52.5 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 18 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	Evaluation: Nov. 2012
<b>Soybean</b>	Nov. 2012/Mar. 2013	4.2 of N, 42 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 42 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2013
		10.5 of N, 52.5 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 52.5 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 18 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2013		Evaluation: Nov. 2013
<b>Soybean</b>	Nov. 2013/Mar. 2014	4.2 of N, 42 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 42 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2014
<b>Experiment IV</b>			
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2011	Without fertilizing	Experiment implementation
			The evaluations had not been initiated.
<b>Soybean</b>	Nov. 2011/Mar. 2012	4.6 of N, 46 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 46 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	
		11 of N, 55 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 55 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) and 22.25 kg ha <sup>-1</sup> of N (urea)	
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2012		Evaluation: Nov. 2012
<b>Soybean</b>	Nov. 2012/Mar. 2013	4.4 of N, 44 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 44 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2013
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2013	Without fertilization	Cover crop
			It was not evaluated by harvest problems
<b>Soybean</b>	Nov. 2013/Mar. 2014	4.6 of N, 46 of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 46 of K <sub>2</sub> O (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	

The source of N was urea [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>] (45% of N), P was triple superphosphate Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O (45% of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and K was potassium chloride (60% de K<sub>2</sub>O).

**Table 2. Soil chemical attributes before implementation of the treatments in the four experimental areas in dystrophic Oxisol managed under no-tillage system in the Rio Grande do Sul.**

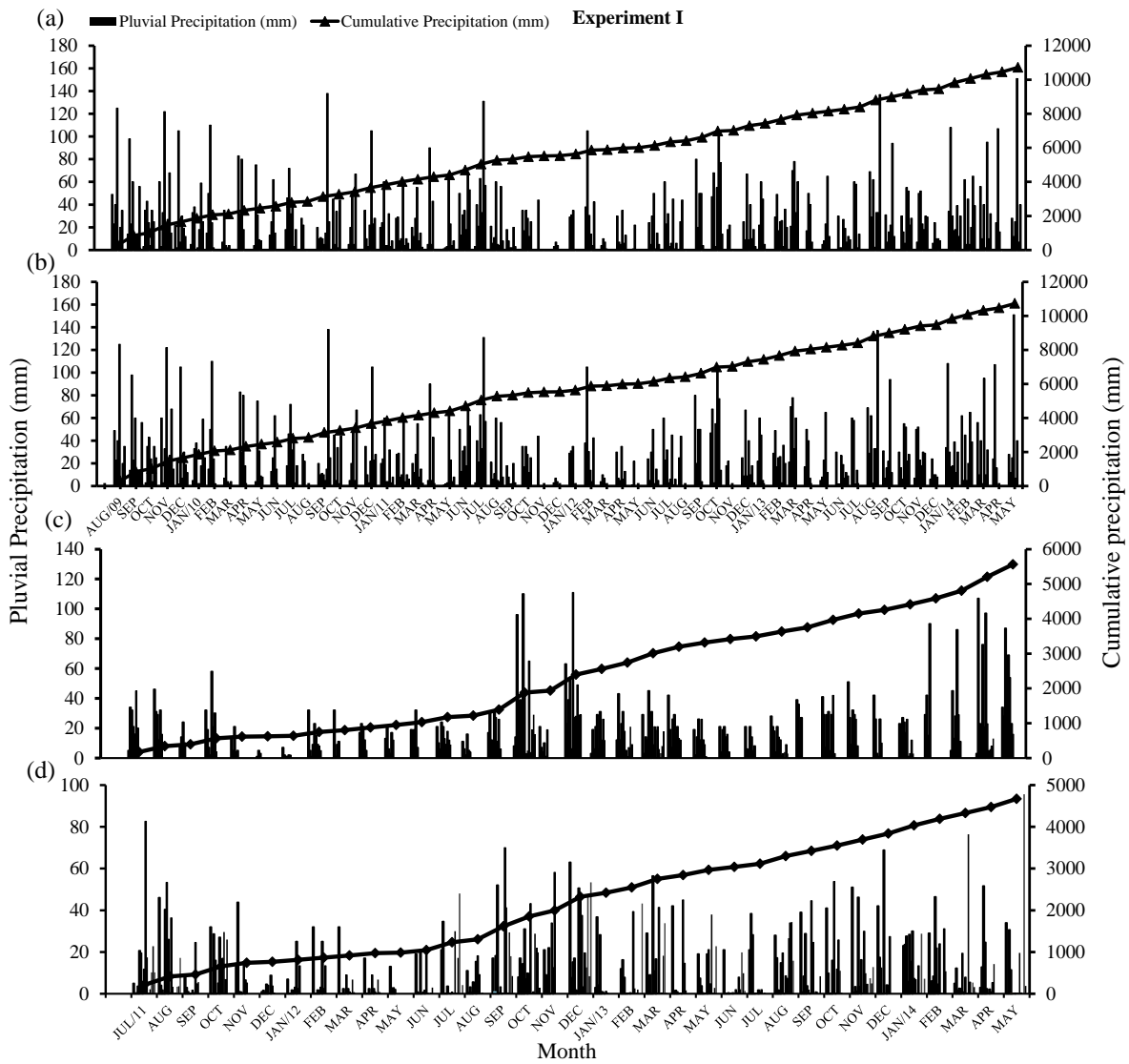
Depth	pH H <sub>2</sub> O	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca/Mg	CEC pH <sub>7,0</sub>	P	S	BS	Al Saturati on	Clay	SOM
(m)	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		---mg dm <sup>-3</sup> ---	-----%-----		----g kg <sup>-1</sup> ----		
<b>Experiment I (August 2009)</b>													
0.00-0.05	5.6	0.0	6.7	3.5	0.18	1.9	15.6	28.3	8.6	68.2	0.0	530.0	3.9
0.05-0.10	5.6	0.0	6.1	3.5	0.13	1.7	14.9	10.1	17.3	67.6	0.0	600.0	3.4
0.10-0.15	5.4	0.2	5.4	3.2	0.07	1.7	14.8	5.0	12.9	59.9	1.8	670.0	2.8
0.15-0.25	5.2	0.4	4.3	3.0	0.05	1.4	15.2	2.6	10.8	49.5	4.6	680.0	2.0
0.25-0.40	4.9	0.8	2.5	2.6	0.04	1.0	15.6	1.1	14.0	34.8	16.1	700.0	1.6
0.40-0.60	4.5	0.9	2.1	2.3	0.03	0.9	15.3	0.8	15.1	30.9	23.9	740.0	1.1
<b>Experiment II (August 2009)</b>													
0.00-0.05	5.9	0.0	4.9	2.2	0.40	2.2	11.6	62.8	16.9	65.6	0.0	240.0	3.6
0.05-0.10	5.7	0.0	4.2	2.0	0.36	2.1	10.3	27.0	14.5	64.9	0.0	320.0	2.3
0.10-0.15	5.7	0.0	3.3	2.0	0.35	1.6	9.7	16.6	10.4	59.1	0.0	370.0	1.7
0.15-0.25	5.4	0.1	2.6	1.8	0.33	1.4	9.4	4.07	8.05	51.4	1.3	460.0	1.3
0.25-0.40	5.1	0.4	2.5	1.3	0.25	1.9	11.4	2.40	9.6	37.8	8.1	500.0	1.3
0.40-0.60	4.8	1.2	1.8	0.7	0.17	2.5	12.2	0.97	7.2	22.3	30.9	520.0	0.7
<b>Experiment III (August 2011)</b>													
0.00-0.05	5.0	0.5	4.5	2.8	0.46	2.0	16.2	29.2	4.9	54.4	5.6	420.0	3.9
0.05-0.10	4.6	1.2	3.1	3.1	0.23	1.0	13.4	6.8	2.3	43.1	15.3	600.0	1.5
0.10-0.15	4.3	1.8	1.9	1.2	0.15	0.9	14.8	3.6	1.1	27.7	29.9	650.0	0.9
0.15-0.25	4.2	2.5	1.5	1.7	0.09	0.9	13.2	2.4	6.2	21.0	42.3	770.0	0.9
0.25-0.40	4.2	2.4	1.4	1.6	0.06	0.9	11.6	1.6	4.7	23.3	43.2	750.0	0.6
0.40-0.60	4.2	2.1	1.2	1.4	0.06	0.8	11.5	1.8	1.6	23.8	43.3	650.0	0.7
<b>Experiment IV (August 2011)</b>													
0.00-0.05	6.2	0.0	6.5	3.5	0.37	1.9	12.5	14.7	5.2	82.2	0.0	295.0	3.3
0.05-0.10	6.1	0.0	4.7	2.3	0.23	2.0	10.5	12.7	5.2	68.4	0.0	335.0	2.6
0.10-0.15	5.0	0.5	2.3	2.2	0.15	1.1	12.5	10.7	4.2	37.0	9.9	400.0	2.5
0.15-0.25	4.7	1.3	1.7	1.8	0.11	0.9	13.0	4.0	2.4	28.0	25.7	440.0	2.3
0.25-0.40	4.4	2.9	1.4	1.1	0.10	1.2	20.0	2.3	5.7	13.4	52.6	500.0	1.9
0.40-0.60	4.2	4.3	1.1	0.5	0.08	1.1	22.3	0.9	12.1	9.6	66.9	610.0	1.2

Al- Aluminum: extracted with KCl 1 mol L<sup>-1</sup> and titrated with NaOH 0.0125 mol L<sup>-1</sup>, Ca- Calcium: extracted with KCl 1 mol L<sup>-1</sup> and determined by atomic absorption spectrophotometry, Mg- Magnesium: extracted with KCl 1 mol L<sup>-1</sup> and determined by atomic absorption spectrophotometry, K- Potassium: extracted with Mehlich-I solution, CEC<sub>pH7,0</sub>- cation exchange capacity in pH 7,0, P- Phosphorus: extracted with Mehlich-I solution, S- Sulfur: extraction with Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (500 mg L<sup>-1</sup> of P) and determined by turbidimetry, BS- Base saturation, SOM- Soil organic matter: extracted by wet combustion.

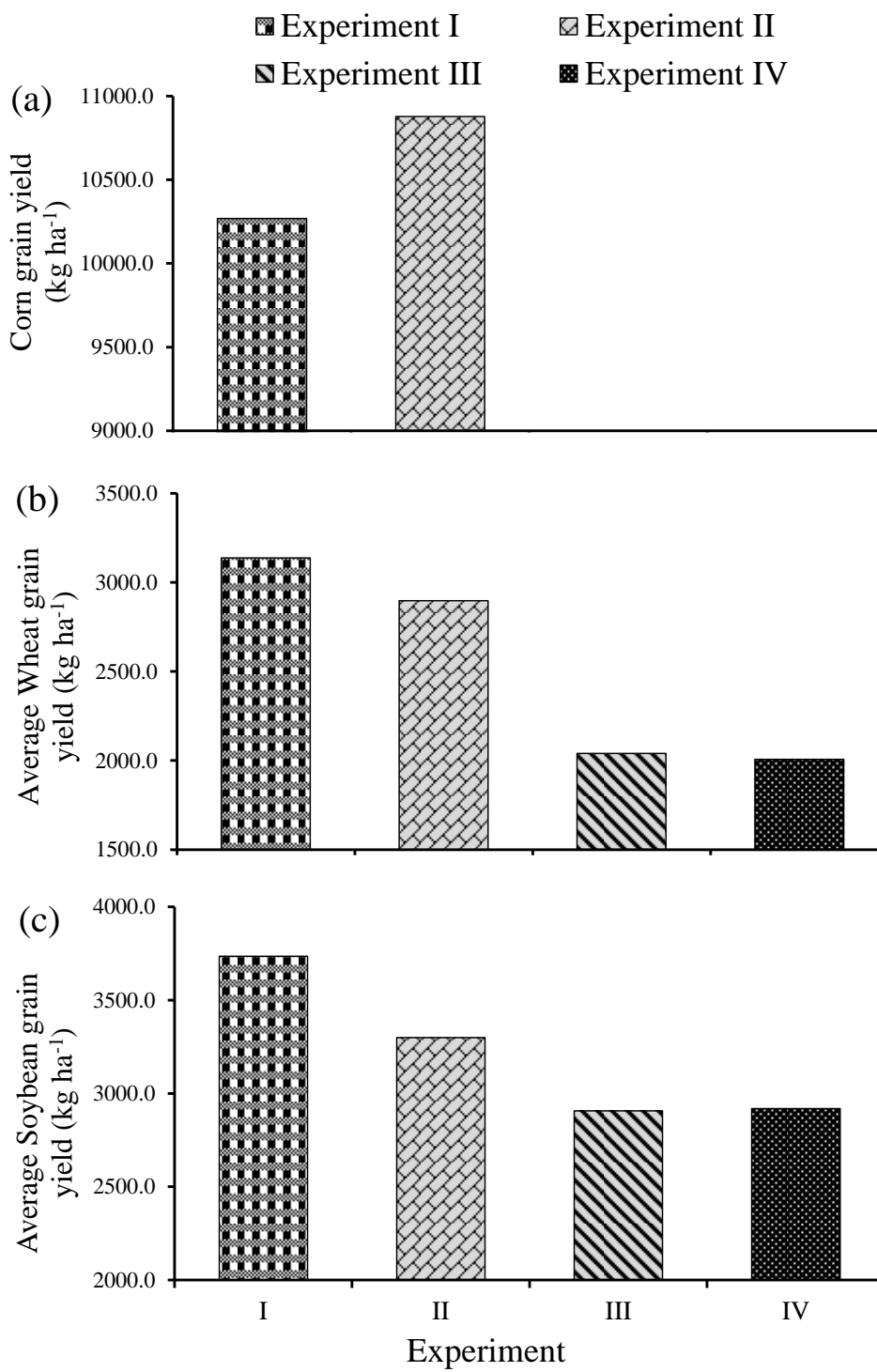
**Table 3: Accumulated yield of six harvests for the Experiment I, five harvests for the Experiment II, four harvests for the Experiment III and two harvests for the Experiment IV.**

Accumulated yield (Mg ha <sup>-1</sup> )						
----- Experiment I -----		----- Experiment II -----		----- Experiment III <sup>†</sup> -----		
Gypsum (Mg ha <sup>-1</sup> )	Accumulated yield	Gypsum (Mg ha <sup>-1</sup> )	Accumulated yield	Gypsum (Mg ha <sup>-1</sup> )	Accumulated yield	
0.0	34882	0.0	23673	0.0	10107	
1.0	34825	1.0	23620	1.0	10537	
2.0	35871	2.0	25165	2.0	10972	
3.0	36682	3.0	25578	3.0	11172	
4.0	36255	4.0	25550	4.0	11292	
5.0	37120	5.0	25469	5.0	11061	
6.5	36663	6.5	25254			
<b>Effect</b>						
$y = 34603.0 + 771.8x - 67.0x^2$		$y = 23396.0 + 967.1x - 105.4x^2$		$y = 10068.0 + 614.7x - 81.6x^2$		
R <sup>2</sup> =0.85* (Experiment I)		R <sup>2</sup> =0.86* (Experiment II)		R <sup>2</sup> =0.98** (Experiment III)		
----- Experiment IV <sup>&amp;</sup> -----						
Gypsum (Mg ha <sup>-1</sup> )	0.0	Lime (Mg ha <sup>-1</sup> )		2.4	3.6	4.8
		<b>Accumulated yield</b>				
0.0	4927		5433		5534	5586
2.0	5083		5647		5730	5651
4.0	5252		5711		5837	5824
6.0	5289		5742		5770	5726
<b>Effect</b>						
$y = 4900.3 + 132.1**G - 11.4**G^2 + 316.3**L - 37.4**L^2 - 6.8GL*$						
R <sup>2</sup> =0.98* (Experiment IV)						

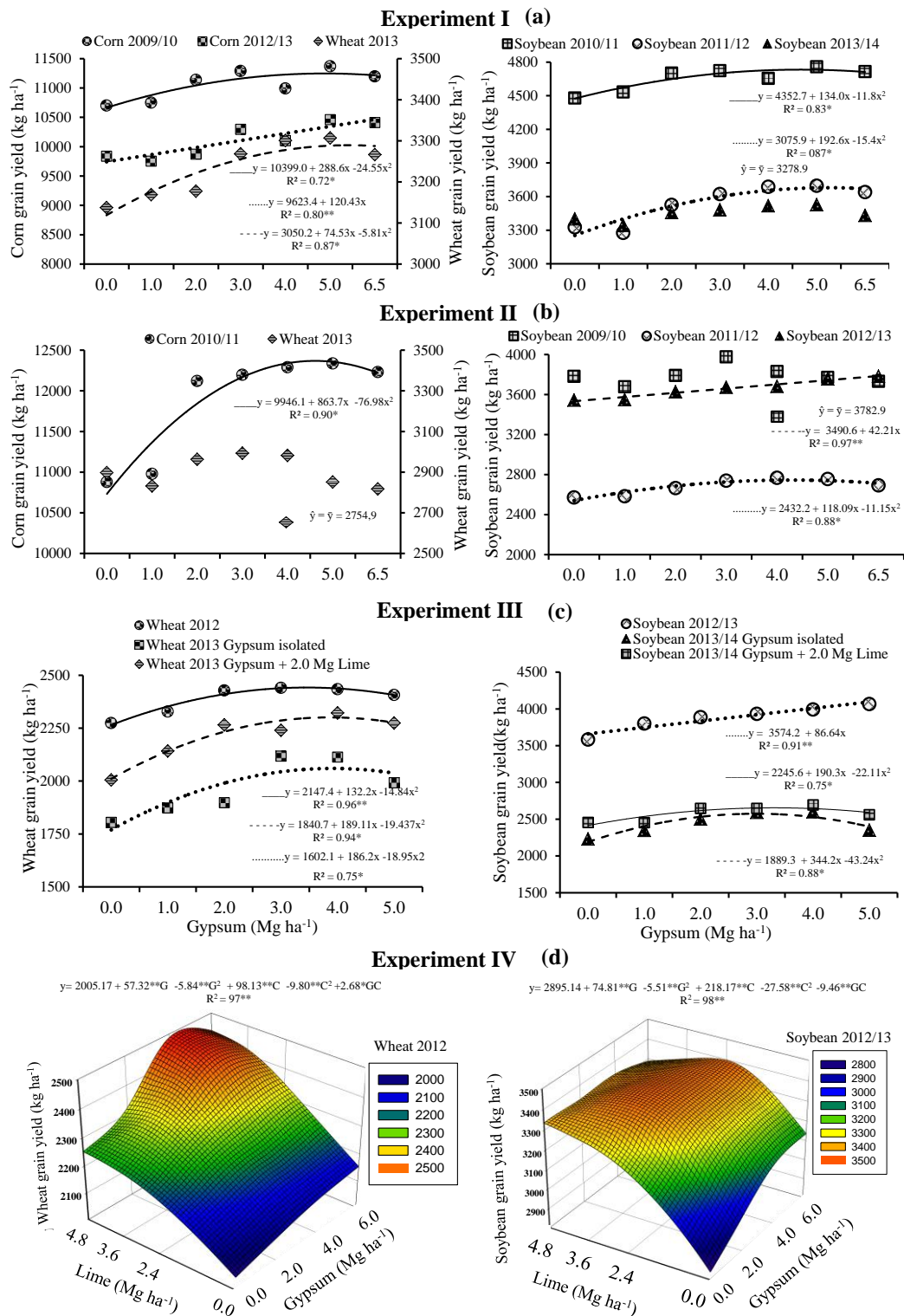
<sup>†</sup>For Experiment III was held the average yield between the treatments with gypsum alone and combined with lime; \*Significative at 5% error probability; \*\*Significative at 1% error probability.. <sup>&</sup>There was a significant interaction between doses of gypsum and lime with the yield at 5% error probability.



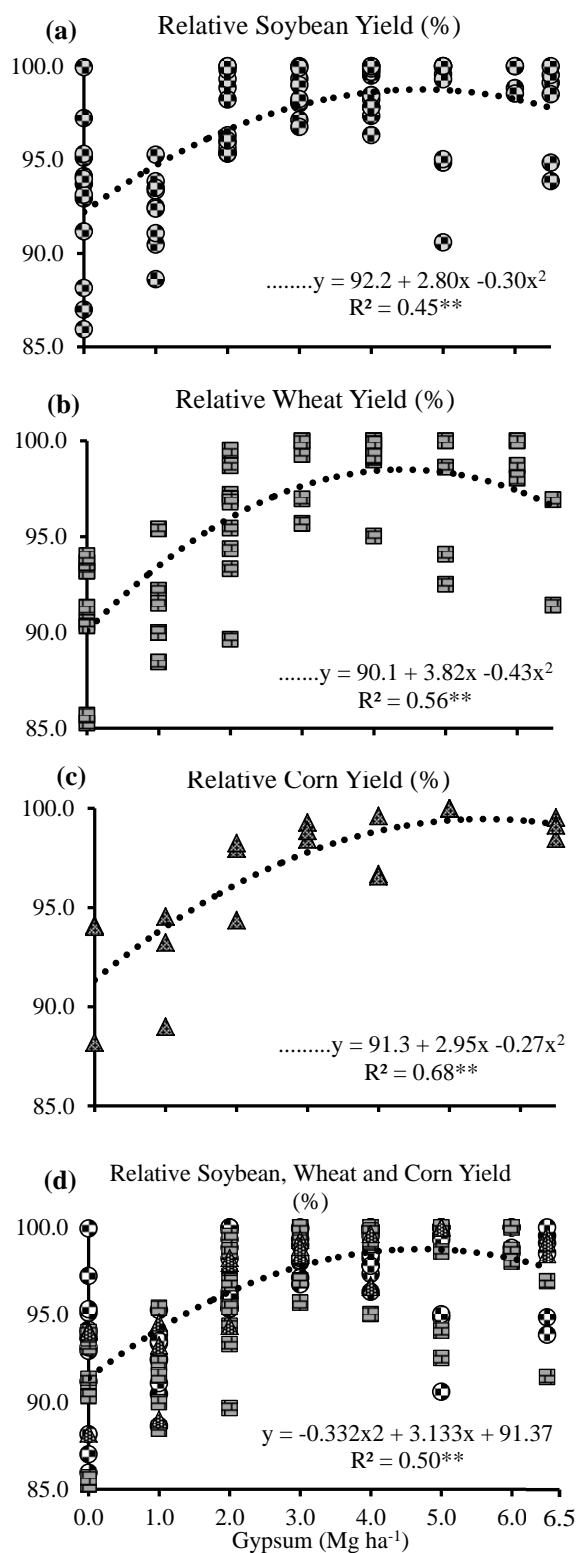
**Figure 1: Daily and cumulative precipitation during the experimental period for the Experiments I, II, III and IV. Source: Instituto Nacional de Meteorologia.**



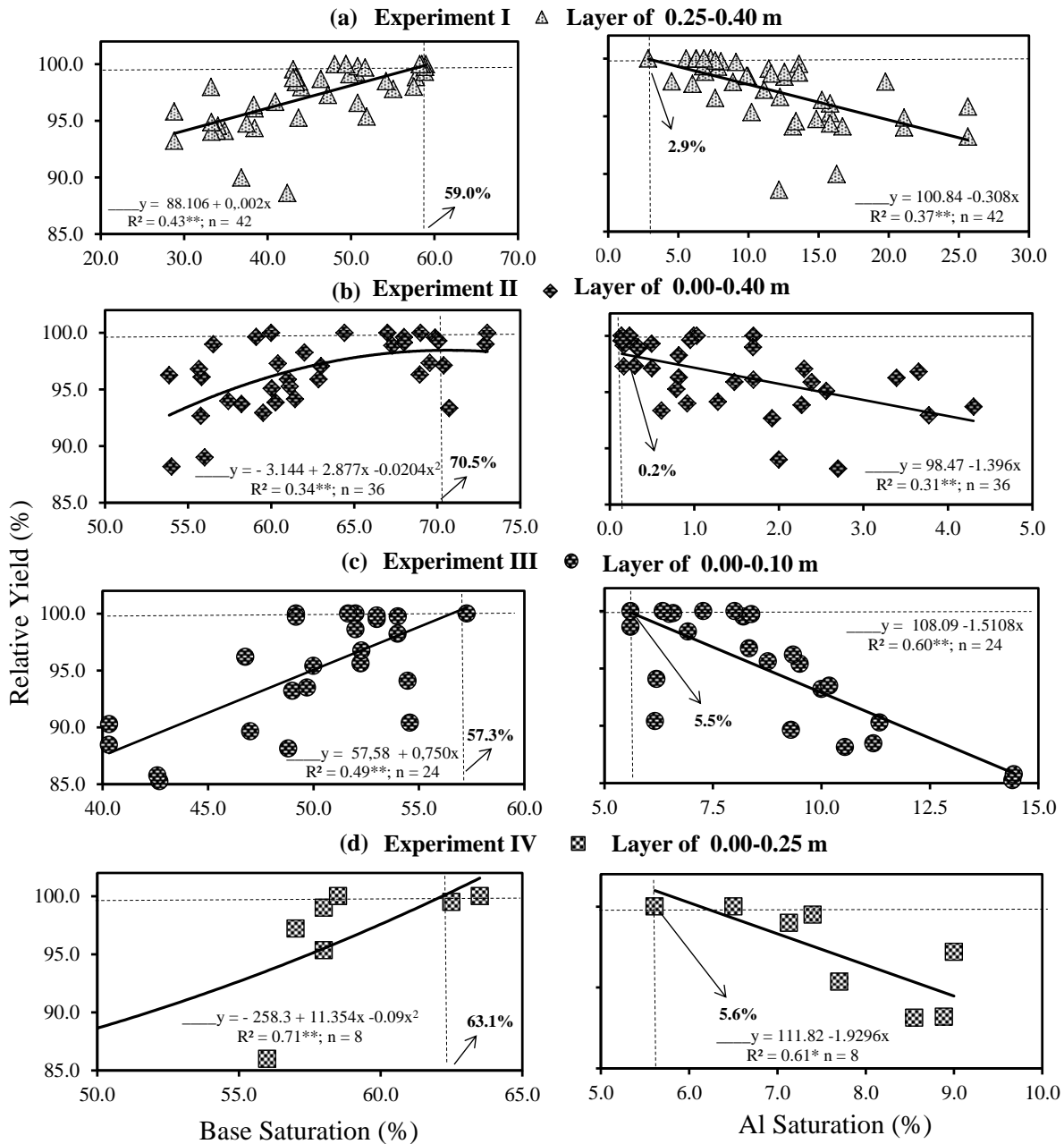
**Figure 2: Average yield of the check plots of corn (a), wheat (b) and soybean (c).**



**Figure 3: Yield of soybeans, corn and wheat for Experiment I (a), Experiment II (b), Experiment III (c) and Experiment IV (d) in relationship to the singly gypsum rates or combined with the lime. \*Significant at 5% error probability; \*\*Significant at 1% probability of error.**



**Figure 4: Relationship between relative soybean yield (a), wheat (b), corn (c) and all crops together (d) for all experiments together with the isolated gypsum rates or combined with the lime. \* Significant at 5% error probability; \*\* Significant at 1% error probability.**



**Figure 5: Relationship between the relative yield of soybeans, corn and wheat with base saturation (BS) and Al saturation in the layer of 0.25-0.40 m for the Experiment I (a); between the relative yield of soybean, corn and wheat, with BS and Al saturation in the layer of 0.00 to 0.40 m for the Experiment II (b); between the relative yield of soybean and wheat with BS and Al saturation in the layer of 0.00 to 0.10 m for Experiment III (c); between the relative yield of soybean and wheat with BS and Al saturation in the layer of 0.00 to 0.25 m for Experiment IV (d).**



## **7. ARTIGO III - Precipitation use efficiency in rainfed grain crops by alleviation of subsoil acidity in no-till Oxisols**

**\*Artigo formatado de acordo com as normas da revista Agronomy Journal**

### **7.1. ABSTRACT**

Gypsum is an important conditioner in agricultural soils due to the amelioration of subsoil chemical quality without disturbance. Its role in mitigation of water stress in grain crops in soils with acid subsoils is still not fully understood. This study investigated the precipitation use efficiency (PUE) of grain crops under continuous no-tillage (NT) after the chemical improvement of a deeper soil layer (0.00-0.40 m) compared to restricted improvement to the topsoil (0.00-0.10 m). Four experiments were conducted with single application of gypsum or combined with lime for Typic Hapludox of South Brazil using a randomized complete block design with three replications. Soil sampling was stratified in layers for the 0.00-0.60 m soil profile. Grain yield was evaluated for 17 site-crop-years. The input of gypsum (Experiment I and II) increased base saturation (BS) and reduced  $Al^{+3}$  saturation mainly in subsurface. However, these effects were intensified when the gypsum inputs were combined with lime (Experiment III and IV). There was increase in PUE in crop seasons with water stress. The lowest PUE, under water stress, occurred where the topsoil layer was corrected and had acidity in the subsurface. Already, the input of gypsum increased PUE with quadratic and linear adjustments. The input of  $5.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum completely mitigated the water stress effect induced by precipitation exclusion chambers on soybean grain yield. The chemical improvement of a thicker layer in an Oxisol was an effective strategy to increase PUE and reduce the effect of short duration water stress on crop yield.

**Abbreviations:** NTS, No-till systems; SOM, Soil organic matter;  $Al^{+3}$ , Aluminum;  $Ca^{+2}$ , calcium; RZL, Root zone layer; RS, Rio Grande do Sul; USA, United States; PUE, Precipitation use efficiency; S- $SO_4^{2-}$ , Sulfur;  $F^-$ , Fluorine;  $P_2O_5$ , Phosphate;  $CaCO_3$ , Calcium oxide; MgO, Magnesium oxide;  $Mg^{+2}$ , Magnesium; P, Phosphorus;  $K^+$ , Potassium; BS, Base saturation; N, Nitrogen;  $NO_3^-$ , Nitrate; QUE, Water use efficiency; PUEc, Precipitation use efficiency in critical period.

No-till systems (NTS) provide many advantages in relation to other tillage systems in tropical environments with faster planting, reduced labor and fuel consumption, increased soil organic matter (SOM) and soil fertility and reduced erosion (Bollinger et al., 2007; Blanco-Canqui and Lal, 2008; Amado et al., 2009; Moussa-Machraoui, et al., 2010). As a result, NTS had an expressive increase in grain area in Brazil reaching 60% of the cropland (Derpsch and Friedrich, 2009).

However, in many croplands, the lack of crop rotation and cover crops has led to insufficient soil cover and physical and chemical soil impediments that prevent greater root penetration (Denardin et al., 2008; Wingeyer et al., 2015). The low chemical improvement of the Oxisol subsurface under continuous NTS is associated with slow vertical movement of calcium carbonate with surface applications (Bortoluzzi et al., 2014). Notably, the low lime rate and the longer time between applications result in a soil profile characterized by an abrupt vertical chemical gradient between the surface and subsurface layers (Blanco-Canqui and Lal, 2008; Caires, 2013; Bortoluzzi et al., 2014; Dalla Nora et al., 2014a).

Generally, the shallow topsoil layer of NTS has the following characteristics: (i) lower aluminum toxicity ( $Al^{+3}$ ) due to surface lime application and complexation with SOM (Brown et al., 2008; Alleoni et al., 2010); (ii) high concentrations of exchangeable cations (Caires et al., 2006); and (iii) higher soil moisture due to the residue retention (Salton and Mielniczuk, 1995;

Moussa-Machraoui et al., 2010). These characteristics favor the concentration of the root system in the topsoil. The subsurface acidity prevents deep root growth of grain crops (Shainberg et al., 1989; Farina et al., 2000), even under favorable soil physical conditions, such as deep profile, good structure, aeration, and drainage as in Oxisols (Foloni and Rosolem, 2006).

The high  $\text{Al}^{+3}$  concentration and low calcium content ( $\text{Ca}^{+2}$ ), which are the most frequent chemical barriers for root growth in the subsoil, compromise the water use efficiency, and intensifies the impact of short duration water stress on crop yields (Marengo et al., 2007, Joris et al., 2013; Dalla Nora et al., 2014a; Bergamaschi and Matzenauer, 2014). The occurrence of a vertical gradient in chemical quality in the root zone layer (RZL) contributes to crop yield instability in tropical and subtropical regions (Dalla Nora et al., 2014a).

The Rio Grande do Sul (RS) state, which is the third largest soybean producer in Brazil, with over 5.5 Mha area, has high temporal instability of crop yield. Bergamaschi et al. (1989) found that under water stress in the agricultural year of 1990/91, average soybean yield was  $1.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ , while in the following year with a better rainfall distribution soybean yield was  $2.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ . In the past decade, at least four severe droughts were observed, particularly for the 2004/05 and 2011/12 seasons, which reduced yields by 30% of State production for soybean (Emater, 2012). According to Bergamaschi and Matzenauer (2014), the 2004/05 drought resulted in an estimate grain loss of 9.0 M ton with a profit loss of US\$ 1.0 billion (LSPA, 2008).

Soil management strategies that mitigate short duration water stress have been recently reviewed for tropical and subtropical environments (Joris et al., 2013). Lime and gypsum amendments for tropical soils should consider the high nutritional requirements of modern cultivars (Bender et al., 2015), its lower acidity tolerance, short crop cycle, high yield potential and the probability of water stress occurrence. Innovative farmers have pursued to create a

deeper RZL with reduced  $Al^{+3}$  and high  $Ca^{+2}$  allowing deeper roots, higher yields, and yield stability.

Recent studies conducted in Brazil (Caires et al., 2005; 2011; Souza et al., 2012; Caires, 2013; Dalla Nora and Amado, 2013; Blum et al., 2014; Pauletti et al., 2014) and in the United States (USA) (Chen et al, 2008; Watts and Torbert 2009; Chen and Dick, 2011; Watts and Dick, 2014) have reported increased grain yields with gypsum input, mainly under water stress. However, the improvements in the precipitation use efficiency (PUE) due to the soil amelioration are not frequently reported in the literature, despite its importance as a strategy for adaptation to extreme events associated with climate change. In this context, the main objective of this study was to investigate the chemical improvement of a deeper soil layer (0.00-0.40 m) compared to a shallow topsoil layer improvement (0.00-0.10 m) on the PUE of grain crops under continuous NTS.

## **7.2. MATERIAL AND METHODS**

### **7.2.1. Description of the experimental areas**

In this study, four fields were selected with a similar soil type that were managed under long-term NTS, but with distinct history of lime input (acidity correction program), cover crops and crop rotations that resulted in different chemical qualities in the RZL. The fields were located in three representative counties of grain crop production in the RS state. Two experiments were implemented in 2009 in Carazinho (Experiment I and II), which were considered as medium term (five years). Experiment I was located at 28°19'S and 52°55'W, altitude of 595 m, with an annual precipitation of 1821 mm and an average annual temperature of 16.0°C. Experiment II was located at 28°17'S and 52°47'W, at an altitude of 617 m and same values of annual precipitation and an average temperature as Experiment I. Two other experiments were implemented in 2011 in São Miguel das Missões (Experiment III) and Tupanciretã (Experiment IV), which were considered as short-term (three years). Experiment

III was located at 28°40'S and 54°23'W, altitude of 265 m with an annual rainfall of 1651 mm and average annual temperature of 15.0°C. Experiment IV is located at 29°00'S and 53°94'W coordinates, altitude of 507 m with an annual precipitation of 1766 mm and an average annual temperature of 17.0°C. In all experiments, the soil was classified as Typic Hapludox (Soil Survey Staff, 2010) with clay texture (Embrapa, 2006). According to Koppen (1938), the climate is classified as humid subtropical (Cfa). The precipitation during the experiment period and the main evaluations in the soil and crops are shown in Fig. 1.

Prior to initiation of the experiments, the fields were managed under continuous NTS for more than 15 years, receiving lime inputs around 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> with 80% effective CaCO<sub>3</sub> equivalent spaced at intervals of 3 to 5 years. Preceding the experiment establishment, the fields were cultivated with black oats (*Avena strigosa* Schreb) that were chemically terminated with glyphosate [N- (phosphonomethyl) glycine]. Subsequently, gypsum was broadcast by hand in August 2009 for the Experiments I and II. For Experiments III and IV, treatment applications occurred in 2011. In Experiment III, gypsum was applied in August 2011 and lime in August 2013. In Experiment IV, the combined rates of gypsum and lime were applied concomitantly in August 2011.

The crop cycle, fertilizers inputs and soil and crop evaluations in the four experimental areas are shown in Table 1. The crop sequence was the following: Experiment I - corn (*Zea mays* L.) / wheat (*Triticum aestivum* L.) / soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] / black oat / soybean / black oat / corn / wheat / soybean; Experiment II - soybean / black oat + radish oil (*Raphanus sativus* L.) / corn / black oat / soybean / black oat / soybean / wheat / soybean; Experiment III – black oat / soybean / wheat / soybean / wheat / soybean; Experiment IV – black oat / soybean / wheat / soybean / black oat / soybean. In general, the first experiment represented a more intense crop rotation (3 soybean for 2 corn crops), followed by the second experiment (3 soybean for 1 corn crop) and the third and fourth experiment (having rotation

only in the winter and monoculture soybean in the summer). These cropping systems are typically of RS.

The cultivars and hybrids used in the study were modern and with high performance: Pioneer 3069 in Experiments I and II and DeKalb 240 in Experiments III and IV for corn; Nidera 5909 in Experiments I and II and 235RR Coodetec in Experiments III and IV for soybean; Quartz in Experiments I and II and BRS Tarumã in Experiments III and IV for wheat. These genetic materials represent the most adopted cultivars in RS state. Corn was planted at the density of 4.0 seeds  $m^{-1}$  with 0.50 m plant row spacing; soybean was planted at the density of 12.0 seeds  $m^{-1}$  (inoculated with *Bradyrhizobium japonicum*) with 0.50 m plant row spacing; wheat was planted at the density of 60 seeds  $m^{-1}$  spaced at 0.20 m plant row.

The initial soil chemical characterization was carried out prior to initiation of the experiments by five soil samples taken randomly in each experimental area in the following depths: 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15; 0.15-0.25; 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m. Soil chemical analysis of the initial characterization according to the methods described in Tedesco et al. (1995) are shown in Table 2.

### **7.2.2. Experimental Design**

The experimental design in all fields was a randomized block design with three replications. Each plot had an area of 64.0  $m^2$  with dimensions 8.0 x 8.0 m. In Experiments I and II, which had the shallow topsoil layer already corrected, the treatments were the following gypsum rates: 0.0; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0, and 6.5  $Mg\ ha^{-1}$  applied on the soil surface. Experiment III had acid characteristics even in the shallow topsoil layer and the investigated treatments were: 0.0; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0 and 5.0  $Mg\ ha^{-1}$  of gypsum applied on the soil surface. In April 2013 after 22 months of gypsum application, the main treatments were divided into subplots of 0.0 and 2.0  $Mg\ ha^{-1}$  of dolomitic lime. Experiment IV had the shallow topsoil layer already corrected and treatments were a split-plot design with plots composed by gypsum rates of 0.0;

2.0; 4.0 and 6.0 Mg ha<sup>-1</sup> the subplots ranging of 0.0; 2.4; 3.6 to 4.8 Mg ha<sup>-1</sup> of lime. The gypsum and lime inputs were applied simultaneously on the soil surface.

Agricultural gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) used in the experiments had the composition of 210 g kg<sup>-1</sup> of Ca<sup>+2</sup>, 155 g kg<sup>-1</sup> of sulfur (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 0.024 g kg<sup>-1</sup> of fluorine (F<sup>-</sup>) and 9.0 g kg<sup>-1</sup> of phosphate (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). The dolomitic lime had 30% of CaO and 20% of magnesium oxide (MgO) with 80% effective calcium oxide (CaCO<sub>3</sub>) equivalent.

### 7.2.3. Main soil and crop evaluations

In Experiment I, soil samples were collected at 6, 14, 22, 32, 44 and 56 months after treatment application. In Experiment II, soil samples were taken at 6, 22, 32, 44, and 56 months after treatment application. In Experiments III and IV, samples were taken at 15 and 30 months after treatment application. In Experiment III, soil sampling at 30 months was eight months after lime input in the subplots. The soil sampling strategy was to collect three subsamples to form a composite soil sample in the following depths: 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.15, 0.15-0.25, 0.25-0.40, and 0.40-0.60 m by opening manual trenches with dimensions of 0.3 x 0.3 x 0.6 m. Soil samples were collected with a spatula on the front wall of the trench and dried with forced air ventilation and removal of roots and plant residues.

The soil chemical determinations were: water pH (1:1 soil-water), Al<sup>+3</sup> extracted with KCl 1 mol L<sup>-1</sup> and titrated with NaOH 0.0125 mol L<sup>-1</sup>, Ca<sup>+2</sup> and magnesium (Mg<sup>+2</sup>) extracted with KCl 1.0 mol L<sup>-1</sup> and determined by atomic absorption spectrophotometry, phosphorus (P) and potassium (K<sup>+</sup>) were extracted with Melich-I solution. The P concentration was determined by a colorimeter using ammonium molybdate and the K<sup>+</sup> content was determined by flame photometry. Sulfur was extracted with Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O (500 mg L<sup>-1</sup> of P) and determined by turbidimetry.

The corn, soybean, and wheat, crop yields were collected manually. Crop yield samples were collect near where soil samples were taken. Grain was collected four linear meters (two meters on each row per subplot), and grain yield was corrected for 13% moisture.

#### **7.2.4. Chambers for partial natural precipitation exclusion**

In order to evaluate the effect of chemical soil improvements by the single use of gypsum under induced water stress, chambers of precipitation exclusion were installed in 2011/12 and 2013/14 in soybean in Experiment I. These chambers consisted of plastic strips mounted on a wooden frame which excluded approximately 30% of rainfall. To avoid lateral flux, plastic bands were buried around the chamber avoiding horizontal water flow. In Experiment I, the treatments selected to receive the chambers were 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum. The treatments with 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum had a chemical improvement in subsurface soil layers (Table 4).

#### **7.2.5. Classification of the precipitation: observed, normal and ideal for grain crops**

Rainfall observed during the crop growth cycle and the phenological critical period of each grain crop was obtained from a weather station near the experiments. The normal rainfall during the crop cycle and the critical period was based on the 30y average (from 1961-1990) obtained from the Meteorology National Institute database (Inmet, 2014).

In relation to the ideal precipitation for corn, according to Bergamaschi et al. (2001) and Radin et al. (2003) in an average of four years (1993/94 to 1996/97) the corn water consumption was 5.1 mm per day. Thus, the consumption in mm during the evaluation period was obtained by multiplying the number of crop cycle days by a factor of 5.1 mm (about 765 mm for the cycle). According to Bergamaschi et al. (2007), asymptotic relationships were found between precipitation and the principal crop stages for the main corn areas in RS. In addition, the corn yield production stabilized when the total precipitation was at least 300 mm in the period of 45



days, counting from 5 days before silking stage. Based on this, the precipitation of 300 mm distributed during the critical period was assumed as ideal for the corn production.

According to Bergamaschi et al. (2007), high soybean yields were obtained with 650 to 700 mm of precipitation regularly distributed during the crop cycle (7 to 8 mm day<sup>-1</sup>). The same authors observed that at least 300 mm during the critical period of 60 days was necessary, which represents the flowering to seed filling stage. In this way, it was assumed 675 mm as the ideal precipitation for the whole crop cycle and 300 mm for the critical period.

For wheat, Westphalen (1983) reported that the ideal precipitation during the crop cycle was 3.9 mm day<sup>-1</sup>. However, this precipitation was more critical during the booting, heading, and seed filling stages for a total of 50 days. Thus, the number of days of the whole crop period and days of the critical period were multiplied by a factor of 3.9 mm resulting in an optimum precipitation for the wheat crop of approximately 507 mm for the whole crop cycle and 195 mm for the critical period.

#### **7.2.6. Statistical analysis**

The results were analyzed by variance analysis (ANOVA) using the Proc GLM procedure in SAS (Statistical Analysis Systems Institute Inc., 2009) in a complete block randomized design. Regression analyses were performed using the Proc Reg procedure in SAS. When there was a significant effect on the single gypsum rates or combined with lime input with base saturation and Al<sup>+3</sup> saturation for the last soil sample period, the treatment effect was analyzed by regression analysis. When significant effects between treatments and PUE (kg mm<sup>-1</sup> precipitated) (Hatfield et al., 2001), the effect was analyzed by regression analysis. The base saturation (BS) and Al<sup>+3</sup> saturation in each soil layer was investigated in the gypsum treatments: 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> were analyzed by the F test and compared by Tukey test. In the treatments with rainfall exclusion, the average grain yields were analyzed by the F test and compared by Tukey test with a significance of  $p < 0.05$ .

### 7.3. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 7.3.1. Characterization of the soil chemical attributes at the experiment installation

Generally, Oxisols of wet tropical and subtropical regions have acid characteristics due to the intense process of weathering and leaching of bases (Jenny, 1994; Fageria and Baligar, 2008; Sumner, 2009). Lime was the most widely input used to ameliorate acidity. With the large adoption of NTS, lime has been applied on the soil surface without mechanical incorporation into the soil. As a consequence, the slow vertical movement of calcium carbonate associated with its low water solubility restricts the improvement of chemical attributes to shallow topsoil layers (Shainberg et al., 1989; Farina et al., 2000; Liu and Hue, 2001; Conyers et al. 2003; Foloni and Rosolem, 2006; Masud et al, 2015). The presence of  $Al^{+3}$  and low  $Ca^{+2}$  in the subsoil managed under continuous NTS creates a chemical barrier to root development (Sumner et al., 1995; Shainberg et al., 1989; Caires et al., 2008b; Dalla Nora and Amado, 2013).

In this study, the presence of a chemical quality gradient in the RZL was noted in two experimental areas (Experiments III and IV) (Table 2). In Experiment III, soil acidity was already present in the surface layer (0.00-0.05m). Due to the application of low lime rates and long time periods between reapplication. In this case, the lime correction effect was insufficient even for amelioration of the shallow topsoil layer (0.00-0.10 m) and to offset the acidification associated with nitrogen (N) fertilization, SOM mineralization, and export of bases via grain harvest (Liu et al., 2001; Caires, 2008a; 2013). In Experiment IV, the deterioration of the soil chemical quality occurred at a depth of 0.15 m, creating an abrupt vertical chemical gradient. Masud et al. (2015) reported that lime applied on soil surface could increase the  $Ca^{+2}$  in the 0.10-0.20 m layer, although it mainly affected the adjacent topsoil layer. The abrupt transition in the chemical quality of the RZL is a limiting factor to crop yield (Reeve and Sumner, 1972; Nava et al., 2012; Pauletti et al., 2014; Masood et al., 2015) particularly when associated with

the presence of  $Al^{+3}$  in the subsurface. This effect was intensified under water stress during the critical period of crop growth (Hatfield, 2001; Bergamaschi and Matzenauer, 2014).

On the other hand, in Experiments I and II, the correction of acidity provided a deeper rooting layer, as the innovative farmers are currently doing, so the acidity characteristics only were observed down to the 0.25 and 0.40 m depth, respectively. These results were associated with the application of high rates of lime, the short time between reapplication, use of cover crops and crop rotation, and enhanced biological activity that created physical-hydraulic soil conditions, such as diameter and continuity of pores that enhanced the water infiltration and vertical movement of fine particles of lime (Amaral et al., 2004). According to Helyar (1991); Sumner et al. (1995); Rheinheimer et al. (2000) and Caires et al. (2005), the reduction of acidity below the lime application layer only occurred when the soil pH reached values between 5.0 and 5.6. In this context, high and frequent rates of lime in the long term may neutralize the acidity in the subsurface (Caires et al., 2011). According to Tang et al. (2003) the improvement of acid subsoil by surface lime application was observed during a 15-year period in an experiment carried out in Australia. In addition, Conyers and Scott (1989) reported increased subsoil pH with high rates of lime ( $8.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) applied at the surface. Martins et al. (2014) reported the correction of subsurface pH with surface lime input in an integrated crop-livestock system. Organic compounds can contribute to  $Al^{+3}$  complexes and facilitate the vertical movement of  $Ca^{+2}$  (Curl and Truelove, 1986). In heavy rainfall conditions, typical of tropical humid climates,  $S-SO_4^{2-}$  can be leached out of the root zone of grain crops during one crop season (Dalla Nora et al., 2014b). However, cover crops and pastures, which have a deeper root system, contribute to better nutrient cycling in the RZL. The role of cover crops such as radish oil, which has high nitrate ( $NO_3^-$ ) and  $S-SO_4^{2-}$  cycling capacity, may enhance the effect of gypsum.

In southern Brazil, the current lime recommendation in NTS is based on the surface soil layer (0.00-0.10 m) with the following acidity characteristics:  $\text{pH H}_2\text{O} < 5.5$ ;  $\text{BS} < 65\%$  and  $\text{Al}^{+3}$  saturation  $> 10\%$  (CQFS-RS/SC, 2004). Based on these criteria, Experiments I, II and IV (Table 2) should have a poor response to liming. In Experiment III, all chemical attributes were below the critical value (Table 2), suggesting a high probability of response to lime.

The use of gypsum for Oxisols in Central Brazil, Sousa and Lobato (2002) suggested as critical levels of  $\text{Ca}^{+2} < 0.5 \text{ cmolc dm}^{-3}$  and  $\text{Al}^{+3}$  saturation  $> 20\%$  in the layer 0.20-0.40 m. In this study, the soils of Experiments III and IV had  $\text{Al}^{+3}$  saturation above the critical level, which suggests high probability of response to gypsum (Table 2). The clay content is considered one of the key attributes that affect the gypsum movement through the soil profile (Quaggio and Van Raij, 1996). The higher the clay content the more difficult it is to improve the subsurface chemical quality because it requires high rates of gypsum. The clay content for 0.20-0.40 m layer for Experiments I, II, III and IV were 700, 500, 750 and 500  $\text{g kg}^{-1}$ , respectively (Table 2).

### **7.3.2. Improvement of subsurface chemical attributes by surface application of gypsum and lime**

The single use of gypsum or combined with lime has been one of the main alternatives to improve the chemical quality of subsurface layers in systems with minimum mechanical soil disturbance (Joris et al., 2013; Caires et al., 2011; Dalla Nora and Amado, 2013). The lime and gypsum input affect the soil cation ratios. The  $\text{S-SO}_4^{2-}$  input promotes vertical movement of cations through the soil profile (Cichota et al., 2007; Okuma and Ahmed, 2011) due to its high mobility in the soil solution. Thus, while the dolomitic lime increases  $\text{Ca}^{+2}$  and magnesium ( $\text{Mg}^{+2}$ ) contents in the shallow topsoil layer, the high solubility of gypsum releases  $\text{S-SO}_4^{2-}$  contributing to downward movement of  $\text{Ca}^{+2}$  and  $\text{Mg}^{+2}$  through the formation of anions and

cation complexes with neutral charge (Cichota et al., 2007; Okuma and Alves, 2011; Masud et al., 2015; Farina et al., 2000; Sumner, 2009; Raij, 2010; Watts and Dick, 2014). The increase in  $\text{Ca}^{+2}$  in subsurface layers favors  $\text{Al}^{+3}$  dislocation from the soil exchange sites promoting the formation of  $\text{AlSO}_4^+$ , which is leached out of the RZL. Foloni and Rosolem (2006) previously reported that  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  accumulation in the soil profile was different, because the  $\text{S-SO}_4^{2-}$  moved faster and to deeper layers than  $\text{Ca}^{2+}$ . This process contributes gradually to the increase in the soil thickness of the chemical enhanced layer in acid Oxisols (Malavolta et al., 1997; Nava et al., 2012; Rheinheimer et al., 2000; Dalla Nora et al., 2013).

In this study, a significant interaction between gypsum rates and the time elapsed after application ( $p < 0.05$ ), confirmed the effect on soil chemical attributes (increase in BS and decrease in  $\text{Al}^{+3}$ ) occurred gradually. In this study, only the results for the last soil sampling were presented (Table 4) because the previous soil sampling had the same trend as the last. For Experiments I and II, soil sampling was taken after 56 months and for Experiments III and IV, after 30 months (Table 4).

In Experiment I, the BS in 0.00-0.05 and 0.05-0.10 m soil layers was not affected by gypsum input ( $p > 0.05$ ). When the experiment was initiated, the BS of these shallow layers were already with values  $> 65\%$ , so the lack of change in BS in this layer by gypsum applications was not a negative factor (Table 2). However, BS increased in the middle (0.10-0.15 m) and subsurface soil layers (0.25-0.40 m and 0.40-0.60 m). These last two soil layers had low BS values ( $< 35\%$ ) and the increase in BS (Table 4) *stimulated* deeper *root* growth. This result was associated with the increase in pH (5.6) in the shallow layers, which increased the negative charges of surface minerals that are pH dependent, favoring the migration of  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , especially of the neutral ionic  $\text{CaSO}_4$  compost (Shainberg et al. 1989; Camargo and Raij, 1989) (Table 2). In deeper and acid soil layers, the dissociation of  $\text{CaSO}_4$  is favored, increasing the  $\text{Ca}^{+2}$  content,

and consequently increasing the BS (Pavan et al., 1984) and decreasing the  $Al^{+3}/Ca^{+2}$  ratio, which stimulates the deepening root growth.

In Experiment I, the greatest increases in BS were observed in the treatments with high gypsum rates for the layers of 0.25-0.40 m ( $y = 28.4 + 7.52x - 0.75x^2$ ;  $p < 0.05$ ) and 0.40-0.60 m ( $y = 27.5 + 8.04x - 1.01x^2$ ;  $p < 0.01$ ) having increases of 66% (5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input) and 56% (4.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input), respectively, when compared to the control treatment. The superior chemical quality of shallow layer (0.00-0.10 m) and the absence of  $Al^{+3}$  increased the downward movement of  $CaSO_4^0$ . Caires et al. (2006) have previously reported similar results, and 56 months after gypsum application of 9.0 Mg ha<sup>-1</sup>, BS increase only in layers deeper than 0.40 m. This result was associated with the high mobility of  $CaSO_4$  with percolating water (Quaggio et al., 1993). Masud et al. (2015) reported that the higher rates of  $Ca^{+2}$  and  $Mg^{+2}$  leaching were observed with isolated gypsum input. This effect decreased with the combination of gypsum and lime or isolated use of lime. For the treatment with single lime input, only 8.3% of the  $Ca^{+2}$  applied was leached out the RZL, compared to 22.0 and 41.5% with lime + gypsum and single gypsum input, respectively. Souza et al. (2012) in a Brazilian Midwest soil reported an increment in the BS in the 0.20-0.30 m layer 55 months after gypsum application.

The  $Al^{+3}$  saturation reduction in subsoil was associated with two processes: a) the increase of  $Ca^{+2}$  and  $Mg^{+2}$  content, and the decreasing  $Al^{+3}/Ca^{+2}$  and  $Al^{+3}/Mg^{+2}$ , and  $Al^{+3}/Ca^{+2}+Mg^{+2}$  ratios; and b) vertical movement of  $Al^{+3}$  to deeper layers bond with the sulfate anion. These processes were intensified at  $pH > 5.5$ , the absence of  $Al^{+3}$  and high  $Ca^{+2}$  and  $Mg^{+2}$  in the surface layer and the high S- $SO_4^2$  input (Table 4). The greatest reduction of  $Al^{+3}$  saturation (86%) by the use of gypsum was observed in the 0.40-0.60 m layer ( $y = 26.05 - 2.63x + 0.25x^2$ ;  $p < 0.01$ ) at a rate of 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> when compared to the control treatment. The  $Al^{+3}$  saturation in this layer was near 25% at the beginning of the experiment. Therefore, this reduction was important to increase the deepening of root growth. Pauletti et al. (2014) in a

Southern Brazilian Oxisol reported a reduction of up to 54% in  $Al^{+3}$  saturation in subsurface when gypsum was applied superficially.

For Experiment II, a significant positive relationship was observed between gypsum rates and BS in almost all soil layers, except the 0.10-0.15 m layer (Table 4). However, the greatest increase in BS was also found in the subsurface layers of 0.25-0.40 m ( $y = 36.2 + 11.9x - 1.45x^2$ ;  $p < 0.01$ ) and 0.40-0.60 m ( $y = 21.1 + 12.31x - 1.24x^2$ ;  $p < 0.05$ ) with increases of 68% (4.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum) and 147% (5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum), respectively, when compared to the control treatment. Similarly to the previous field, in Experiment II, the 0.00-0.25 m layer had a satisfactory chemical quality when the experiment was initiated (Table 2). These results confirm that the previous correction of surface soil layer enhanced the effect of gypsum in the subsurface. For  $Al^{+3}$  saturation decreased quadratically ( $p < 0.01$ ) in the layers of 0.25-0.40 m ( $y = 18.89 - 7.89x + 0.89x^2$ ;  $p < 0.01$ ) and 0.40-0.60 m ( $y = 36.8 - 9.90x + 0.94x^2$ ;  $p < 0.01$ ) in response to gypsum, with reductions of 245% (4.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum) and 236% (5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum), respectively, when compared to the control treatment. It was noteworthy that in the 0.40-0.60 m soil layer  $Al^{+3}$  saturation was  $> 30\%$  (Table 2). Souza et al. (2012) had previously reported similar results with gypsum applications in an Oxisol. The quadratic adjustment suggests that the subsurface correction in a clay soil requires high rates of gypsum.

For Experiment III a linear increment in BS in response to gypsum input was observed in most soil layers, except for 0.10-0.15 and 0.15-0.25 m layers which had a quadratic relation ( $p < 0.05$ ) (Table 4). It was noteworthy, that the soil of this area was the most acid (pH  $< 5.0$ , BS  $< 50\%$  and  $Al^{+3}$  saturation  $> 15\%$  up to 0.05 m) among the investigated fields (Table 2). According to the equations adjusted for subsurface soil layers of 0.15-0.25 m ( $y = 21.4 - 1.88x + 0.92x^2$ ;  $p < 0.05$ ) and 0.25-0.40 m ( $y = 19.1 + 1.98x$ ;  $p < 0.01$ ), BS increased 12% (2.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum) and 52% (5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum), respectively, when compared to the control. In this latter layer when the experiment was installed, the BS was lower than 25% and  $Al^{+3}$

saturation was higher than 40% indicating a strong chemical barrier to deep root growth (Table 2). After 30 months from gypsum application, there was a decrease in  $Al^{+3}$  saturation for most of the soil layers investigated (Table 4), except the 0.00-0.05 m and 0.40-0.60 m layers (Table 2). The soil layers of 0.15-0.25 m ( $y = 39.69 + 5.16x - 1.22x^2$ ;  $p < 0.05$ ) and 0.25-0.40 m ( $y = 39.75 + 4.40x - 1.16x^2$ ;  $p < 0.05$ ) were the most affected by gypsum, where the rate of  $2.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  decreased  $Al^{+3}$  saturation by 76% and 59%, respectively, in relation to the control.

For Experiment IV, 30 months after gypsum application combined with  $3.6 \text{ Mg ha}^{-1}$  of lime, there was no change in the BS in the shallow soil layer (Table 4). Although it was an expected result, it is necessary to emphasize that at the initiation of the experiment the surface layer already had a  $pH > 6.0$  and  $BS > 75\%$  at 0.00-0.10 m depth (Table 2). However, an increase in subsoil BS was the objective of the chemical inputs, this goal was achieved with a quadratic increase ( $p < 0.05$ ) for the depths of 0.15-0.25 m ( $y = 34.27 - 8.62x + 2.15x^2$ ), 0.25-0.40 m ( $y = 22.47 - 6.05x + 1.26x^2$ ) and a linear increase ( $p < 0.01$ ) for 0.40-0.60 m layer ( $y = 8.37 - 2.17x + 0.75x^2$ ) (Table 4). These increases were 75% ( $2.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum), 40% ( $3.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum) and 167% ( $2.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum), respectively, in relation to the control treatment. In these layers, the BS was lower than 30% and in deeper layers (0.40-0.60 m) was lower than 10% (Table 2). Therefore, these increases in BS were critical to deepening of the root system.

In Experiment IV, the  $Al^{+3}$  saturation decreased linearly in the 0.25-0.40 m ( $y = 54.93 - 2.40x$ ;  $p < 0.05$ ) and 0.40-0.60 m layers ( $y = 69.63 - 2.43x$ ;  $p < 0.01$ ), decreasing 36 and 26%, respectively, for the highest rate of gypsum ( $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) combined with lime, in relation to the control treatment. At the initiation of the experiment,  $Al^{+3}$  saturation in the 0.40-0.60 m layer was higher than 65%, presenting a chemical barrier to root growth.

Taken together, the results indicated that the effect of chemical improvement of the subsurface by gypsum input was effective, gradual, dependent on the rate and topsoil chemical quality. The correction of deep layers was more intense under high rates of gypsum. In addition,



the presence of a corrected surface layer favored the gypsum action improving the subsurface chemical quality. The use of gypsum + lime at the investigated rates when the soil surface was previously corrected did not increase pH and BS in the shallow layer but acted positively in the subsurface, which was the purpose of the input combination. Finally, bases did not leach out of RZL.

### **7.3.3. Temporal variability of precipitation in the investigated experimental fields**

The irregularity in rainfall distribution, which is typical of RS state, was verified during the experimental period (2009-2014). In Experiment I during the corn crop in 2009/10, precipitation was 1804 mm (Fig. 1), while in the 2012/13 season precipitation was 680 mm, a 165% reduction. In the same experimental field during the critical soybean growing period (flowering and grain filling) the precipitation was 317 mm in 2010/11 and 177 mm in the next season (2011/12), a 79% reduction. Similarly, in Experimental II, during the soybean crop, the precipitation was 1239 mm in 2009/10 and 442 mm during the critical growth period. While in 2011/12 season, precipitation was 546 mm and 137 mm, respectively, representing decreases of 127 and 223%.

The precipitation observed during the entire crop cycle and the critical growth period in the experimental areas investigated were compared to normal and ideal precipitation (Table 3). There was high temporal (crop seasons) and spatial (experimental fields) variability in precipitation. The south region of Brazil is influenced by synoptic and sub-synoptic weather systems, affected by large-scale circulations and localized, which has tropical and extratropical origin (Climanálise, 1986). This high precipitation variability has an important consequence on the yield of grain crops. Bergamaschi et al. (1989) and Berlato (1992) have reported that in years with severe water stress (1978/79, 1985/86, 1987/88 and 1990/91) average soybean yield

in RS state was lower than  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$ . On the other hand, under favorable precipitation, soybean yield was close to  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Considering all crops and fields surveyed during the experimental period, four crops among the 17 investigated had lower precipitation than ideal considering the entire cycle. On the other hand, 10 crops among the 17 investigated had lower precipitation than the ideal considering the critical growth period (Table 3). The irregularity in the temporal precipitation distribution has been identified as the main cause of grain yield instability in southern Brazil (Bergamaschi and Matzenauer, 2014). However, total precipitation during entire crop season was a poor indicator of grain yield than precipitation during the critical growth period.

Considering the accentuated temporal instability of rainfall in southern Brazil, adaptation of NTS to mitigate the water stress should be a priority. The deepening of root systems of grain crops in order to access stored soil water in deeper layers, and the maintenance of mulch on the soil surface to reduce water loss by evaporation and runoff, stand out as the main alternatives to mitigate the effect of short duration water stress in rainfed fields.

#### **7.3.4. Relationship between the precipitation use efficiency and chemical quality of subsurface layers of Oxisols**

Hatfield et al. (2001), in a review of alternatives to increase the water use efficiency (WUE) by grain crops, reported that the increase in the availability of N, P, and K among other nutrients was an effective strategy. These authors also suggested that it is necessary to better understand the interaction between nutrient availability and WUE. Dystrophic Oxisols having characteristic soil acidity (Jenny, 1994), is known that alleviation of the topsoil acidity increases soil nutrient availability and WUE. However, the role of subsurface chemical improvement to mitigate water stress is less documented (Dalla Nora and Amado, 2013; Dalla Nora et al., 2014b).

In this study, PUE was calculated considering the crop critical period (PUEc) since it is an indicator more related with grain yield. The highest PUEc values were obtained in season crops with the occurrence of water stress, indicating plant adaptation to the environment with lower water availability (Fig. 2). The corn in check plot without water stress during the critical period had a PUE of  $16.7 \text{ kg mm}^{-1}$  and with water stress the values ranged from 28.0 to  $30.7 \text{ kg mm}^{-1}$ . The wheat in the check plot without water stress had a PUE ranged from 6.1 to  $8.7 \text{ kg mm}^{-1}$  and with water stress was  $14.0 \text{ kg mm}^{-1}$ . Soybean without stress had a PUE ranged from 8.5 to  $8.8 \text{ kg mm}^{-1}$  and with stress was up to  $18.2 \text{ kg mm}^{-1}$ . Corn had higher PUEc when compared to wheat and soybean (Fig. 2) which was attributed to its higher grain yield in relation to the other crops. In order to facilitate the understanding of the treatment effect on PUE, the results were split into seasons with and without water stress during critical crop period and by chemical soil quality prior to establishment of the experiment.

#### 7.3.4.1. *Precipitation use efficiency without/low water stress during crop critical period*

Fields with low chemical quality in the root zone layer at experiment installation

In Experiment III, for the 2013 wheat crop, the input of  $4.3 \text{ Mg ha}^{-1}$  of gypsum increased the PUEc by 16% compared to the control treatment (Fig. 2a), with a PUE of  $9.90 \text{ kg per mm}^{-1}$ . Experiment III had the lowest soil chemical quality among the investigated fields (Table 2), suggesting that the chemical improvement of the RZL induced by gypsum input affected positively wheat productivity, even in the absence of a water deficit.

In Experiment IV, for the 2012 wheat crop, the gypsum rate of  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  increased PUEc by 8% (resulting in  $8.89 \text{ kg mm}^{-1}$ ) compared to the control treatment (Fig. 2a). Experiment IV had the highest chemical gradient between the surface and subsurface layers (Table 2). The pronounced effect of gypsum on PUEc of wheat was due to the susceptibility of wheat to acid conditions limiting root growth in the subsurface (Caires et al., 2002; 2008a).

In general, even in the absence of water stress, wheat in soils with low chemical quality in the RZL (Experiment III) or with the abrupt vertical chemical quality transition (Experiment IV), gypsum increased PUEc. This result was associated with the  $Al^{+3}$  saturation in the subsoil (Table 2).

#### Fields with high chemical quality in the root zone layer at experiment installation

For Experiment I in corn (2009/10 season), even without the occurrence of water deficit during the critical growth period (Table 3), 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum increased PUEc by 6% (resulting in 17.6 kg mm<sup>-1</sup>) when compared to control (Fig. 2a). For Experiment I, the 2013 wheat crop 5.6 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum increased PUEc by 9% (resulting in 7.43 kg mm<sup>-1</sup>) when compared to control (Fig. 2a). The increase in PUEc in response to gypsum input in seasons without water restriction and in soils with high quality in the RLZ was not expected and it is important to explore the high yield potential of modern cultivars. In this experimental area, the soybean PUEc did not show a significant relationship with gypsum rates, except in the 2013/14 season (Fig. 2a). Previously, Caires (2008a) also reported a lack of soybean yield response to gypsum input under satisfactory rainfall conditions.

In Experiment II, the 2013 wheat crop (Fig. 2a) and the 2009/10 soybean (Fig. 2a) did not show a significant relationship between PUEc and gypsum rates. These results were explained by the higher volume of precipitation that exceeded the ideal for both crops (Table 3), associated with the fact that the soil in Experiment II had the best subsurface chemical quality among the investigated fields (Table 2). It was notable that the absence of an increase in the PUEc in response to the gypsum input occurred only in three crops seasons without water restriction, all observed in Experiments I and II, which had higher chemical qualities in the RZL.

#### 7.3.4.2. *Precipitation use efficiency under water stress during the crop critical period*

Fields with low chemical quality in the root zone layer at experiment installation

For Experiment III for the 2012 wheat crop, water availability was 16% lower than ideal during the critical growth period (Table 3), 3.5 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum increased PUEc by 8% (resulting in 14.9 kg mm<sup>-1</sup>) when compared to control (Fig. 2b). This value was around 1.5 to 2 times higher than the PUEc without the occurrence of water stress (Experiment I and II). Caires et al. (2002) and Rampim et al. (2011) also reported that wheat yield increased in response to chemical soil improvement by gypsum under water stress condition. Still, for Experiment III, 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input treatment in 2012/13 soybean season increased PUEc by 14% (resulting in 16.4 kg mm<sup>-1</sup>) in relation to control (Fig. 2b). For the 2013/14 soybean season, 3.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum increased PUEc by 12% (11.7 kg mm<sup>-1</sup>) when compared to the control.

For Experiment IV, the 2012/13 soybean crop, 4.5 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum increased PUEc by 3% (11.3 kg mm<sup>-1</sup>) when compared to the control (Fig. 2b).

For soils with low chemical quality and under water stress, all crops investigated showed a PUEc increase in response to gypsum inputs. Water stress intensified the susceptibility of grain crops to acid soils (Freire, 1984), compromising water use efficiency (Reeve and Sumner, 1972; Ritchey, 1980; Shainberg et al., 1989; Farina et al., 2000). Therefore, there was a strong relationship between the subsurface chemical quality and the effect of water stress on grain yield.

In this study, the improving subsoil fertility was an efficient strategy to mitigate water stress.

Experiments with satisfactory chemical quality in the root zone layer at experiment installation

In the 2012/13 corn season, precipitation was 50% lower than ideal during the critical growth period in Experiment I (Table 3). In these conditions, 6.5 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum increased PUEc by 8% (resulting in 32.8 kg mm<sup>-1</sup>) (Fig. 2b). This value was approximately twice that observed in crops without water stress (Experiment I). For the 2010/11 soybean crop, 4.9 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input increased PUEc by 7% (resulting in 13.4 kg mm<sup>-1</sup>) in relation to control (Fig. 2b). In 2011/12 Experiment I 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input increased soybean PUEc by 16% (resulting in 21.6 kg mm<sup>-1</sup>) in relation to the control. This value was 1.4 to 2 times higher than observed for soybean in a year without water deficit. These results reinforce the role of gypsum in mitigating water stress even in a soil with satisfactory chemical soil quality.

For corn (2010/11 season), precipitation was 38% lower than ideal in Experiment II during the critical growth period (Table 3). Gypsum input of 4.9 Mg ha<sup>-1</sup> increased PUEc by 16% (resulting in 31.9 kg mm<sup>-1</sup>) when compared to control treatment (Fig. 2b). This value was approximately 2 times higher than observed for corn in a year with normal precipitation. Caires et al. (2008a; 2008b) reported that the reduction in the soil acidity increased the root growth and improved the nutrition of corn and soybean mainly in years of water stress.

In 2011/12 soybean in Experiment II, 5.5 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input increased PUEc by 9% (resulting in 20.2 kg mm<sup>-1</sup>) when compared to control (Fig. 2b). This relative increment was similar that reported in Experiment I. For the 2012/13 soybean crop, 6.5 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum increased PUEc by 7.0% when compared to control.

The soils that had satisfactory chemical quality in the RZL (Experiment I and II) (Table 2) generally had the highest PUEc, except for the 2012/13 soybean crop (Experiment II) (Fig. 2b). These results agree with the greater chemical improvement of subsoil by gypsum when the topsoil was previously corrected (Table 2).

The PUEc ranged from 17.6 to 32.8 kg mm<sup>-1</sup> for corn (Experiment I) and 6.14 (Experiment I) to 15.7 kg mm<sup>-1</sup> for wheat (Experiment III). In this study, in general soybean suffered water stress during critical crop period. Thus, PUEc was not significantly related to gypsum input only in the soybean seasons of 2009/10 (Experiment II) and 2013/14 (Experiment I) in nine soybean seasons (Fig. 2b). In the presence of water stress during the critical growth period, soybean PUEc ranged from 13.4 to 21.6 kg mm<sup>-1</sup> (Experiment I) for a field with satisfactory chemical quality in the RZL. However, in fields with low chemical quality, PUEc ranged from 3.0 (Experiment IV) to 16.4 (Experiment III) kg mm<sup>-1</sup>. These results were attributed to a higher yield potential in soils with high quality in the RZL. . It is notable that in years with high precipitation, the soybean PUEc in Experiments I and II (satisfactory chemical quality in RLZ) were little affected by gypsum, but in years with water stress, these fields when ameliorated with gypsum had the highest PUEc.

Among the grain crops investigated, the increase in the PUEc induced by gypsum was more pronounced in corn (10% averaged in the three seasons), followed by wheat (8.2% averaged in the five seasons) and finally soybean (7.5% averaged in nine seasons).

### **7.3.5. Gypsum role in mitigating induced water stress effect in soybean yield**

In order to better characterize the relationship between the improvement in the chemical quality of the RZL by gypsum input, three treatments of the Experiment I were selected (control, 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>) during two soybean seasons (2011/12 and 2013/14). In these treatments, water stress was induced by excluding 30% of the natural precipitation by using a chamber. In the first crop season investigated (2011/12), the natural water deficit was 274 mm during the soybean entire cycle and 62 mm during the critical growth period (Table 3). In the second crop season (2013/14), there was no water stress during the crop cycle based on the volume of precipitation. In addition, precipitation in the second soybean season was 92% higher

during entire crop cycle and 54 % higher during the critical growth period compared to the first season. However, the treatment with the highest soybean yield in the first crop season was 8.5% higher than the highest treatment in the second season. Still, soybean yield in the control treatment, without precipitation exclusion, was also slightly higher (4.5%) in the first crop season than in the second (Fig. 4). These results might be attributed to uneven rainfall distribution in the second crop season (Fig. 1) and mainly by the deterioration of chemical quality in subsurface layers (decrease in BS and increase in  $Al^{+3}$  saturation). This deterioration in chemical quality was due the time elapsed (32 months) after gypsum inputs in the first soybean season compared to the second (56 months) (Fig. 3).

In both crop seasons, in the control treatment the exclusion of natural precipitation decreased soybean yield ( $p < 0.05$ ) in relation to without exclusion as expected (Fig. 4). In the first soybean season, the precipitation exclusion reduced the soybean grain yield by  $354 \text{ kg ha}^{-1}$  (12%) and in the second by  $555 \text{ kg ha}^{-1}$  (19%). The largest decrease in the second crop was associated with a higher volume of precipitation and consequently of exclusion, which were 231 and 110 mm, excluded for the entire soybean cycle and the crop critical growth period, respectively. During the first crop season, these values were 120 and 71 mm, respectively (Table 3). It is worth noting that the relationship between kg of yield decreased (grain yield in the control treatment without precipitation exclusion – grain yield in the control treatment with precipitation exclusion) per mm of precipitation excluded during the critical period was the same ( $5.0 \text{ kg yield decrease ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  of excluded precipitation) regardless the investigated crop season.

Two treatments with gypsum input in the first crop season, with and without rainfall exclusion, showed soybean yields higher than the baseline (control). These results were associated with the higher residual gypsum in the first crop season that favored the plant nutrition supply with  $Ca^{+2}$  and  $S-SO_4^{2-}$  (gypsum fertilization). This fact is supported by the



higher yield in the first crop season and a greater difference between soybean yield with 5 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input (highest rate) and the control without exclusion (15.0%) than the observed in the second crop season (4.0%) for the same treatments (Fig. 4).

In the first crop season, 32 months after 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input, and the BS was up to 65% in the 0.00-0.25 m soil layer and the Al<sup>+3</sup> saturation < 5% in the 0.00-0.40 m layer (Fig. 3a). Previously, Caires (2012) in an Oxisol in southern Brazil reported that the BS of 70% in the 0.00-0.20 m layer provided the highest economic return of grain crops in a period of 10 years. In this study, the subsurface layers of 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m, with 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum input, had BS increases of 59 and 67%, respectively, in comparison to the control. The Al<sup>+3</sup> saturation remained below 7% up to 0.40-0.60 m soil depth, represent a reduction of 14% when compared to the control for the layers of 0.25-0.40 and 0.40-0.60 m (Fig. 3a).

For the second crop season, which excluded a higher volume of precipitation, all investigated treatments with precipitation exclusion had lower soybean yields in comparison to the control treatment without rainfall exclusion (baseline) (Fig. 3b).

After 56 months of treatment application in the second crop season, there was a reduction in the gypsum effect in ameliorating chemical attributes. This effect was more pronounced mainly in the treatment with the intermediate gypsum rate (3.0 Mg ha<sup>-1</sup>) and in the deeper layers, In this case, the BS was lower (26%) than the verified in the treatment with 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum in the 0.25-0.40 m soil layer (Fig. 3b). The Al<sup>+3</sup> saturation in deeper layers was 41% higher () in the 3.0 Mg ha<sup>-1</sup> gypsum rate in relation to the rate of 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>. The more intense effect on the amelioration of chemical subsurface attributes and with longer duration of the treatment with the highest gypsum rate is an agreement with previous studies carried out in Oxisols (Caires et al., 2003; Raij, 2010; Souza et al., 2012; Dalla Nora et al., 2014b; Pauletti et al., 2014).

In the first crop season, the rainfall excluded during the critical period was equivalent to 50% of the precipitation considered as ideal (Table 3). Thus, the control treatment had the lowest soybean yield among the investigated treatments (Fig. 4a). However, even under precipitation exclusion, the treatments with gypsum inputs (3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>) had higher yields (13 and 15%, respectively) than the control without precipitation exclusion. These results indicate that the gypsum input completely mitigated the induced water stress (exclusion of 1.2 mm day<sup>-1</sup> during the critical growth period of soybean (60 days)) (Fig. 4B).

In the second crop season (2013/14), when a higher volume of precipitation was excluded, the control had decreased yield that was 57% higher than in the first crop season without precipitation exclusion (Fig. 4c). In the second crop season, 3.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum treatment partially mitigated (26%) the negative effect of water stress, resulting in a soybean yield reduction of 409 kg ha<sup>-1</sup>. This result may be in part attributed to a loss of gypsum residual after have elapsed 56 months since the treatment applications (Fig. 3b). For the 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> gypsum treatment, the induced water stress was totally mitigated. This result agrees with those obtained in the first crop season with the highest gypsum rate (Fig. 3a).

The gypsum effect on mitigating water stress can be also addressed by comparing the treatments with precipitation exclusion (Fig. 4) and crops under drought stress in natural precipitation (Fig. 2). Thus, in Experiment II in 2011/12 soybean season under natural precipitation, water stress was 62 mm in the critical growth period and with precipitation exclusion was induced a deficit of 71 mm. In the control treatment with precipitation exclusion, the PUEc was 17.4 kg mm<sup>-1</sup> (Fig. 4) and under natural precipitation, the PUEc was 18.5 kg mm<sup>-1</sup> in the same treatment (Fig. 2b). In this crop season, under natural precipitation, the gypsum rates quadratically increased the PUEc ( $R^2=0.96$ ;  $p<0.01$ ). The maximum technical efficiency (MTE) rate based on the adjusted equation was 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum, with a PUEc of 21.6 kg mm<sup>-1</sup> and an increase of 16.0% compared to the control treatment (Fig. 2b). With 5.0 Mg ha<sup>-1</sup>

of gypsum and precipitation exclusion in 2011/12 season, PUEc was 22.3 kg of grain mm<sup>-1</sup>, with an increase of 25.0% in relation to the control treatment (Fig. 4). In the 2013/14 crop season with precipitation exclusion PUEc increased 16.0% with the same gypsum input. These results support that induced water stress had a similar behavior to that observed under natural precipitation, and in both cases, the application of gypsum was an effective strategy to mitigate water stress effect on soybean yield. This fact was linked to the chemical improvement in the subsurface that provides deeper root growth (Fig. 3) thus allowing plants to use more efficiently the water stored in the soil. In addition, the improvement of physical-hydric soil properties, such as aggregation, infiltration rate and lower soil density, which were not evaluated in this study, may increase the soil water storage (Shainberg et al., 1989; Denardin et al., 2008; Wingeyer et al., 2015).

Therefore, the gypsum effect on mitigating water stress was associated with an increase in PUEc, that in general followed quadratic and linear relationships (Fig. 2) suggesting that high rates of gypsum are required to achieve this goal.

The results of our study reinforce the role of gypsum and the chemical improvement of a deeper soil layer as strategies to mitigate water stress and increase crop grain yield.

#### 7.4. CONCLUSIONS

The observed precipitation during the critical crop growth period was lower than ideal in 10 of 17 crop seasons. The single input of gypsum or combined with lime on the soil surface increased BS and decreased Al<sup>+3</sup> saturation in the subsurface layers. Water stress results in an increase in the precipitation use efficiency in relation to seasons with satisfactory precipitation. However, the addition of gypsum amplified the plant precipitation use efficiency. Chemical improvement of the root zone layer induced by gypsum inputs in a no-till system mitigated partially or totally soybean yield losses associated with water stress. This mitigation was

affected by the gypsum rate and the time after application. The chemical improvement of a thicker soil layer (0.00-0.40 m) in a dystrophic Oxisol was an effective strategy to improve the no-till system.

## 7.5. REFERENCES

- Alleoni, L.R.F., M.A. Cambri, and E.F. Caires. 2005. Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. (In Portuguese, with English abstract.) *R. Bras. Cienc. Solo* 29:923-934. doi: 10.1590/S0100-06832005000600010
- Amado, T.J.C., L.Z. Pes, C.L. Lemainski, and R.B. Schenato. 2009. Chemical and physical attributes of Oxisols and their relation with irrigated corn and common bean yields. *R. Bras. Cienc. Solo* 33:831-843. doi: 10.1590/S0100-06832009000400008
- Amaral, A.S., I. Anghinoni, R. Hinrichs, and I. Bertol. 2004. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. (In Portuguese, with English abstract.) *R. Bras. Cienc. Solo* 28:359–367. doi: 10.1590/S0100-06832004000200014
- Bender, R.R., J.H. Haegele, and E. Frederick. 2015. Below nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. *Agron. J.* 107:563-73. doi: 10.2134/agronj14.0435
- Bergamaschi, H., *H.J. Vieira, L.R. Angelocci, and P.L. Libardi*. 1989. Deficiência hídrica em feijoeiro. IV. Alterações micrometeorológicas. (In Portuguese, with English abstract.) *Pesq. Agropec. Bras.* 24:769-777.

- Bergamaschi, H., L.M.G. Radin, J.I. Rosa, R.S. Bergonci, A.O. Aragonés, S. Santos, and M. Langensiepen. 2001. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. *R. Arg. Agromet.* 1:23-27.
- Bergamaschi, H., and R. Matzenauer. 2014. *O milho e o clima*. 1 ed. Emater-Ascar. Porto Alegre, RS, Brazil.
- Bergamaschi, H.T.R., A.J. Wheeler, F. Challinor, and B.M.M. Heckler. 2007. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. *Pesq. Agropec. Bras.* 42:603-613. doi: 10.1590/S0100-204X2007000500001
- Berlato, M. A. 1992. 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, RS, Brazil. p. 11-24.
- Blanco-Canqui, H., and R. Lal. 2008. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:693-701. doi: 10.2136/sssaj2007.0233
- Blum, B.S., F.J. Garbuió, H.A.W. Joris, and E.F. Caires. 2014. Assessing available soil sulphur from Phosphogypsum applications in a no-till Cropping system. *Exp. Agric.* 50:515-532. doi: 10.1017/S0014479714000015
- Bollinger, A., J. Magid, T.J.C. Amado, F.S. Neto, M.F.S. Ribeiro, A. Calegari, R. Ralisch, and A. Neergaard. 2007. Taking stock of the Brazilian zero-till revolution: A review of

landmark research and farmers practice. *Adv. Agron.* 91:47-64. doi: 10.1016/S0065-2113(06)91002-5

Bortoluzzi, E.C., G.L. Parize, J. Korchagin, V.R. Silva, D.S. Rheinheimer, and J. Kaminski. 2014. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. *R. Bras. Cienc. Solo* 38:262-271. doi: 10.1590/S0100-06832014000100026

Brown, T.T. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping system. 2008. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:634-640. doi: 10.2136/sssaj2007.0061

Caires, E.F. Calagem e uso de gesso em Sistema Plantio. 2012. *R. Plan. Dir.* 128:1-11.

Caires, E. F. 2013. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. *Int. Plant Nutr. Inst.*, Piracicaba, SP, Brazil.

Caires, E.F., J. Blum, G. Barth, F.J. Garbuio, and M.T. Kusman. 2003. Changes in chemical soil characteristics and soybean response to lime and gypsum applications in a no-tillage system. *R. Bras. Cienc. Solo* 27:275-286. doi: 10.1590/S0100-06832003000200008

Caires, E.F., F.J. Garbuio, S. Churka, G. Barth, and J.C.L. Corrêa. 2008a. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. *Eur. J. Agr.* 28:57-64. doi: 10.1016/j.eja.2007.05.002

- Caires E.F., I.C. Feldhaus, G. Barth, and F.J. Garbuio. 2002. Lime and gypsum application on the wheat crop. *Sci. Agric.* 59:357-364. doi:10.1590/S0103-90162002000200023
- Caires, E.F., P.R.S. Pereira Filho, R. Zardo Filho, and I.C. Feldhaus. 2008b. Soil acidity and aluminum toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. *Soil Use Manage.* 24:302–309. doi:10.1111/j.1475-2743.2008.00166.x
- Caires, E.F., S. Churka, F.J. Garbuio, R.A. Ferrari, and M.A. Morgano. 2006. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. *Sci. Agric.* 63:370-379. doi: 10.1590/S0103-90162006000400008
- Caires, E.F., E.H.G. Maschietto, F.J. Garbuio, S. Churka, and H.A.W. Joris. 2011. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. *Sci. Agric.* 68:209-216. doi: 10.1590/S0103-90162011000200011
- Caires, E.F., L.R.F. Alleoni, M.A. Cambri, and G. Barth. 2005. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. *Agron. J.* 97:791-798. doi: 10.2134/agronj2004.0207
- Camargo, O.A., and B.van Raij. 1989. Movimento de gesso em amostras de solo com diferentes propriedades eletroquímicas. (In Portuguese, with English abstract.) *R. Bras. Ci. Solo* 13:275-280.

- Chen, J., A.D. Del Genio, B.E. Carlson, and M.G. Bosilovich. 2008: The spatiotemporal structure of twentieth-century climate variations in observations and reanalyzes. Part I: Long-term trend. *J. Climate* 21:2611-2633. doi:10.1175/2007JCLI2011.1
- Chen, L., and W.A. Dick. 2011. Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines. The Ohio State University Extension, Columbus, OH. <http://ohioline.osu.edu/b945/index.html>. (accessed 27 March 2015).
- Cichota, R., I. Vogeler, N.S. Bolan, and B. Clothier. 2007. Simultaneous adsorption of calcium and sulfate and its effect on their movement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:703-710. doi: 10.2136/sssaj2006.0206
- Climanálise: Boletim de Monitoramento e Análise Climática INPE/CPTEC. 1986. Número especial, Cachoeira Paulista, SP, Brazil.
- CQFS-RS/SC. 2004. Manual de adubação e de calagem para o Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Comissão de química e fertilidade do solo, Porto Alegre, RS, Brazil.
- Conyers, M.K., and B.J. Scott. 1989. The influence of surface incorporated lime on subsurface soil acidity. *Aust. J. Exp. Agric.* 29:201-207. doi: 10.1071/EA9890201
- Conyers, M.K., D.P. Heenan, W.J. McGhie, and G.P. Poile. 2003. Amelioration of acidity with time by limestone under contrasting tillage. *Soil Tillage Res.* 72:85-94. doi: 10.1016/S0167-1987(03)00064-3



- Curl, E.A., and B. Truelove. 1986. The rizosphere. Springer-Verlag. p. 297–336. Using lime to ameliorate topsoil and subsoil acidity. *In* Z. Rengel (ed.) Handbook of Soil Acidity. Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA.
- Dalla Nora, D. and T.J.C. Amado. 2013. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. *Agron. J.* 105:1393-1403. doi: 10.2134/agronj2013.0031
- Dalla Nora, D., T.J.C. Amado, E.M. Gruhn, and A.C.B. Mazuco. 2014a. Formação de um perfil de enraizamento profundo e a estabilidade da produtividade de culturas de grãos sob sistema plantio direto. *R. Plan. Dir.* 1:19-29.
- Dalla Nora, D., T.J.C. Amado, R.P. Bortolotto, A.O. Ferreira, K. Reichard, and A.L. Santi. 2014b. Subsoil chemical amelioration and crop yields under contínuos long-term no-till in a subtropical Oxisol. *Afric. J. Agric. Res.* 9:3338-3349. doi: 10.5897/AJAR2013.8283
- Denardin, J.E., A. Faganello, and A. Santi. 2008. Falhas na implementação do sistema plantio direto levam a degradação do solo. *R. Plan. Dir.* 18:33-34.
- Derpsch, R., T. Friedrich. 2009. Global overview of conservation agriculture adoption. p. 429-438. *In* P.K. Joshi (ed.) Lead Papers, New Delhi, India.
- Emater. 2012. Avançam perdas de Safra de grãos com estiagem no RS. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, Porto Alegre, RS, Brazil. <http://www.emater.tche.br/site/noticias/noticia.php?id=13997>. (accessed 05 may 2014).

Embrapa. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2 ed. Embrapa- CNPS, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

Fageria, N.K., and V.C. Baligar. 2008. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. *Adv. Agron.* 99:345-431. doi: 10.1016/S0065-2113(08)00407-0

Farina, M.P.W., P. Channon, and G.R. Thibaud. 2000. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Longterm growth effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:646-651. doi:10.2136/sssaj2000.642646x

Foloni, J.S.S., and C.A.R. 2006. Rosolem. Efeito da calagem e sulfato de amônio no algodão. I - Transporte de cátions e ânions no solo. (In Portuguese, with English abstract.) *R. Bras. Cienc. Solo* 30:425-432. doi: 10.1590/S0100-06832006000300004

Freire, J.C. 1984. Resposta do milho a níveis de água e formas de aplicação de calcário em dois solos originalmente sob cerrado em casa de vegetação. (In Portuguese, with English abstract.) *R. Bras. Cienc. Solo* 8:305-308.

Hatfield, J.L., T.J. Sauer, and J.H. Prueger. 2001. Managing soils for greater water use efficiency: A Review. *Agron. J.* 93:271-280. doi: 10.2134/agronj2001.932271x

Helyar, K.R. 1991. The management of acid soils. p.365-382. *In* Wright, R.J., V.C. Baligar, and R.P. Murrmann (ed.) *Plant-Soil Interactions at Low pH*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, NL.

- Inmet. 2014. Instituto Nacional de Meteorologia, Brasília, DF, Brazil. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. (accessed 05 june 2014).
- Jenny, H. 1994. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. 281p. Dover Publ, New York, NY, USA.
- Joris, H.A.W., E.F. Caires, A.F. Bini, D.A. Scharr, and A. Haliski. 2013. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. *Plant Soil* 365:409-424. doi: 10.1007/s11104-012-1413-2
- Köppen, W.P. 1938. Das geographic system der climate. *Handbuch der Klimatologie*. Berlin, Germany.
- Liu, J., and N.V. Hue. 2001. Amending subsoil acidity by surface applications of gypsum, lime and composts. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 32:2117– 2132. doi: 10.1081/CSS-120000273
- LSPA. 2008. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – Resenha de Conjuntura. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasília, DF, Brazil.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, and S.A. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional de plantas: Princípios e aplicações. 319p. *In* Potafos (ed). Piracicaba, SP, Brazil.

- Marengo, J., and C.G.C. Camargo. 2007. Trends in Extreme air temperatures in Southern Brazil. *Int. J. Clim.* 11:1858-1863.
- Martins, A.P., I. Anghinoni, S. E. Costa, F. S. Carlos, G. H. Nichel, R.A.P. Silva, and P.C.E. Carvalho. 2014. Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities. *Soil Tillage Res.* 144:141-149. doi: 10.1016/j.still.2014.07.019
- Masud, M.M., J.Y. Li, and R.K. Xu. 2015. Application of alkaline slag and phosphogypsum for alleviating soil acidity in an Ultisol profile: a short-term leaching experiment. *J. Soil. Sediment.* 15:365–373. doi: 10.1007/s11368-014-0993-2
- Moussa-Machraoui, S.B., F. Errouissi, and S. Noura. 2010. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil Tillage Res.* 106:247-253. doi: 10.1016/j.still.2009.10.009
- Nava, G., P.R. Ernani, A.A. Sá, and A.J. Pereira. 2012. Soil Composition and Nutritional Status of Apple as Affected by Long-Term Application of Gypsum. *R. Bras. Cienc. Solo.* 36:215-222. doi: 10.1590/S0100-06832012000100022
- Okuma, D.M., and M.E. Alves. 2011. Anion and mineralogical effects on  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , and  $Mg^{2+}$  leaching in Oxisols. *Soil Sci.* 176:115-123. doi: 10.1097/SS.0b013e31820efe4c

- Pauletti, V., L. Pierri, T. Ranzan, G. Barth, and A.C.V. Motta. 2014. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. (In Portuguese, with English abstract.) *R. Bras. Cienc. Solo* 38:495-505. doi: 10.1590/S0100-06832014000200014
- Pavan, M.A., F.T. Bingham, and P.F. Pratt. 1984. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:33-38. doi: 10.2136/sssaj1984.03615995004800010006x
- Quaggio, J.A., van Raij, B. 1996. Correção da acidez do solo. p. 14-19. *In*: van Raij, B., H. Cantarella, J.A. Quaggio A.M.C. Furlani. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. IAC Circ. 100. Inst. Agronômico de Campinas (IAC), Campinas, SP, Brazil.
- Quaggio, J.A., van Raij, B., P.B. Gallo, and H.A.A. Mascarenhas. 1993. Soybean responses to lime and gypsum and ion leaching into the soil profile. *Pesq. Agropec. Bras.* 28:375-383.
- Rampim, L., M.C. Lana, J.F. Frandoloso, and S. Fontaniva. 2011. Chemical attributes of a soil and response of wheat and soybean to gypsum in no-tillage system. *R. Bras. Cienc. Solo* 35:1687-1698. doi: 10.1590/S0100-06832011000500023
- Reeve, N.G., and M.E. Sumner. 1972. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface applied amendments. *Agrochemophysica.* 4:1-6.
- Rheinheimer, D.S., E.J.S. Santos, J. Kaminski, L.C. Gatiboni, and E.C. Bortoluzzi. 2000. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem

natural. (In Portuguese, with English abstract.) R. Bras. Ci. Solo 24:797-805. doi: 10.1590/S0100-06832000000400012

Ritchey, K.D., D.M.G. Souza, E. Lobato, and O. Correa. 1980. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. Agron. J. 72:40-44. doi: 10.2134/agronj1980.00021962007200010009x

Salton, J.C., and J. Mielniczuk. 1995. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). (In Portuguese, with English abstract.) R. Bras. Cienc. Solo 19:313-319.

SAS Institute. 2009. SAS/STA guide for personal computers. Version 9.2 ed. SAS Inst., Cary, NC.

Shainberg, I., M.E. Sumner, W.P. Miller, M.P.W. Farina, M.A. Pavan, and M.V. Fey. 1989. Use of gypsum on soils. Adv. Soil Sci. 9:1-111.

Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. Natural Resources Conservation Service. 338p. 11 (ed). Washington, DC.

Sousa, D.M.G., and E. Lobato. 2002. Cerrado: correção do solo e adubação. 416p. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, Brazil.

Souza, F.R., E.J.R. Junior, C.R. Fietz, A.C. Bergamin, Y.B.C.J. Rosa, and W.M. Zeviani, 2012. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. (In

- Portuguese, with English abstract.) *Semina: Cienc. Agrárias*. 33:1717-1732. doi: 10.5433/1679-0359.2012v33n5p1717
- Sumner, M.E. 1995. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. p. 147–185. *In* N.S. Jayawardane and B.A. Stewart (ed.) *Subsoil management techniques*. Lewis Publ., Athens, GA.
- Sumner, M.E. 2009. Gypsum improves subsoil root growth. *In* International Symposium "Root Research and Applications". Vienna, Austria. <http://asrr.boku.ac.at/fileadmin/files/RRcd/session01/oral/124.pdf>. (accessed 24 March 2016).
- Tang, C., Z. Rengel, E. Diatloff, and C. Gazey. 2003. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. *Field Crops Res.* 80:235-244. doi: 10.1016/S0378-4290(02)00192-2
- Tedesco, M.J., C. Gianello, C.A. Bissani, H. Bohnen, and S.J. Volkweiss. 1995. Análise de solo, plantas e outros materiais. 174p. Boletim Técnico n° 5. 2.ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- van Raij, B. 2010. Gesso na agricultura. International Plant Nutrition Institute, Piracicaba, SP, Brazil.
- Watts, D.B., and W.A. Dick. 2014. Sustainable Uses of FGD Gypsum in Agricultural Systems: Introduction. *J. Environ. Qual.* 43:246-52. doi: 10.2134/jeq2013.09.0357

Watts, B., and H.A. Torbert. 2009. Impact of gypsum applied to grass buffer strips on reducing soluble P in surface water runoff. *J. Environ. Qual.* 38:1511-7. doi: 10.2134/jeq2008.0378

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

Wingeyer, A.B., T.J.C. Amado, M. Pérez-Bidegain, G.A. Studdert, C.H.P. Varela, F.O. Garcia, and D.L. Karlen. 2015. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. *Sustainability* 7:2213-2242. doi: 10.3390/su7022213



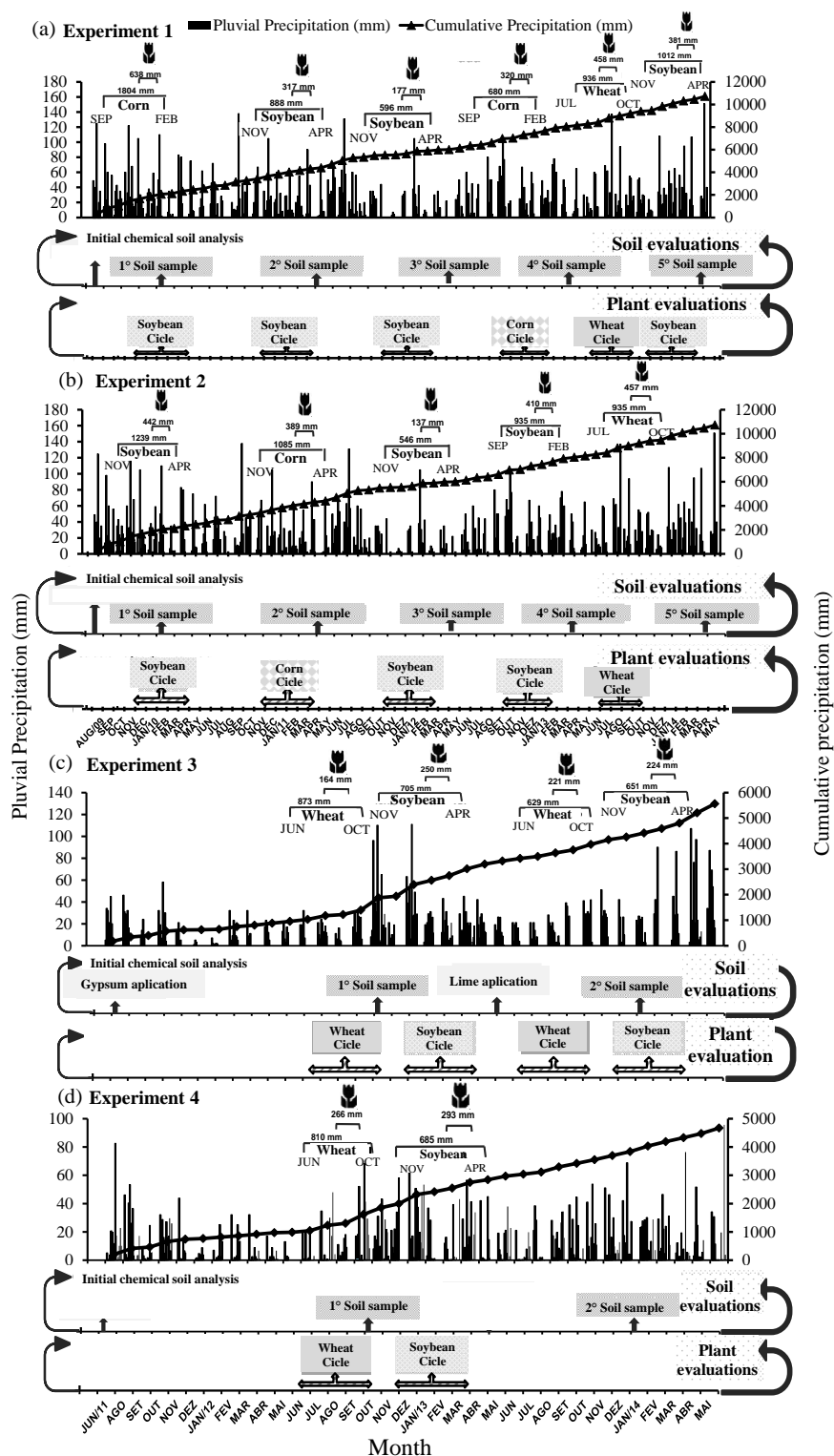


Figure 1: Daily and cumulative rainfall during the experimental period for experiments I, II, III and IV, located in Carazinho, Carazinho, São Miguel das Missões and Tupanciretã, respectively Besides the cultivated crops and the soil and plant samples made in their experiments. Source: INMET.

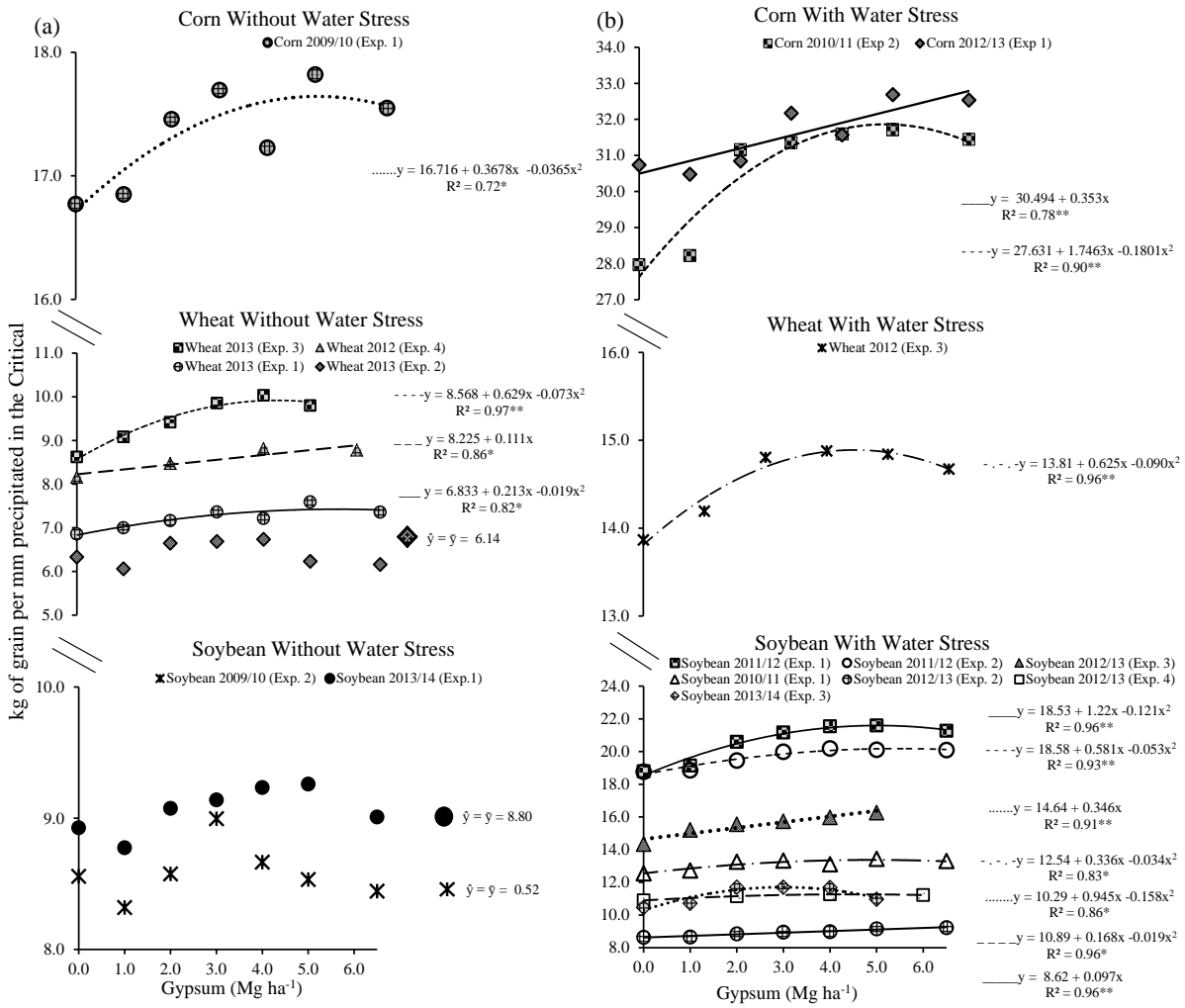


Figure 2: Relation between grain quantity of corn, wheat, and soybeans (kg) per mm precipitated during the critical period without water stress (a) and with water stress (b) with isolated gypsum or combined with lime in Experiments I II, III and IV. \* Significant at 5% error probability; \*\* Significant at 1% error probability.

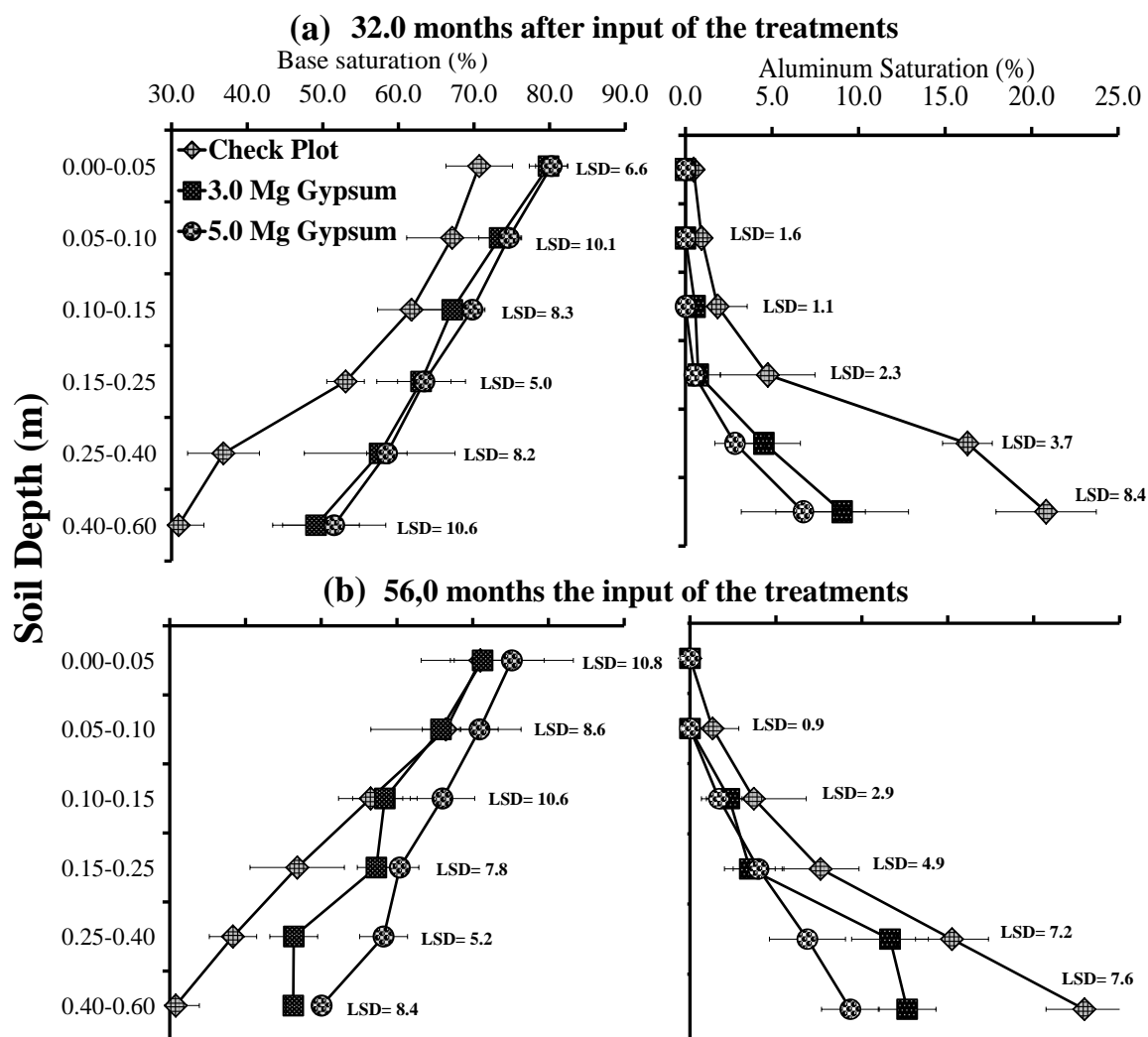


Figure 3: Base and  $Al^{+3}$  saturation at 32 months (a) and 56 months (b) after the treatment application in Experiment I. The collection times refers to the period of installation of rainfall exclusion cameras. Minimum difference statistical (MDS) by the 5% Tukey test probability of error.

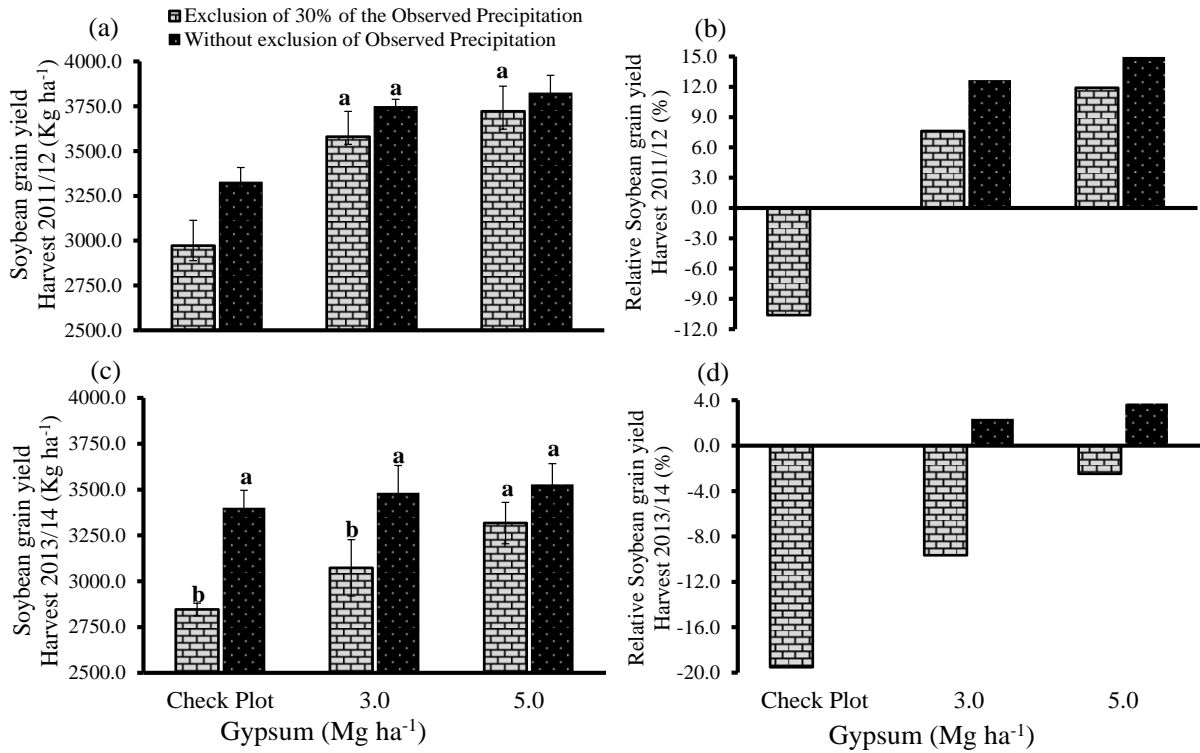


Figure 4: Soybean yield in 2011/12 with the exclusion of 30% and without exclusion of precipitation 32 months after application of 0.0; 3.0 and 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of gypsum (A) and relative yield for the same period (B). Soybean yield in 2013/14 harvest with the exclusion of 30% of precipitation and without exclusion 54 months after the application of 0.0; 3.0 to 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> rates of gypsum (C) and relative yield for the same period (D).

**Table 1: Crop sequence in Experiments I, II, III and IV, crop cycle, fertilizer used, and the time of evaluation of productivity.**

<b>Experiment I</b>			
<b>Crops</b>	<b>Cycle</b>	<b>Fertilizing</b>	<b>Yield Evaluation</b>
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2009	Without fertilizing	Experiment implementation
<b>Corn</b>	Sept. 2009/Feb. 2010	190 kg ha <sup>-1</sup> of N (20 kg ha <sup>-1</sup> starter and 170 kg ha <sup>-1</sup> broadcast), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O	Evaluation: Feb. 2010 It was not harvested due to frost at flowering
<b>Wheat</b>	July to Nov. 2010	230 kg ha <sup>-1</sup> of 5-25-25 formulated and 45 kg ha <sup>-1</sup> of N	Evaluation: Apr. 2011
<b>Soybeans</b>	Nov. 2010/Apr. 2011	240 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Cover crop
<b>Black oats</b>	May to Oct. 2011	Without fertilizing	Evaluation: Feb. 2012
<b>Soybeans</b>	Nov. 2011/Apr. 2012	240 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Cover crop
<b>Black oats</b>	May to Aug. 2012	Without fertilizing	Evaluation: Feb. 2012
<b>Corn</b>	Sept. 2012/Feb. 2013	190 kg ha <sup>-1</sup> of N (20 kg ha <sup>-1</sup> starter and 170 kg ha <sup>-1</sup> broadcast), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O	Evaluation: Nov. 2013
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2013	220 kg ha <sup>-1</sup> of 5-25-25 formulated and 40 kg ha <sup>-1</sup> of N	Evaluation: Mar. 2014
<b>Soybeans</b>	Nov. 2013/Mar. 2014	220 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	
<b>Experiment II</b>			
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2009	Without fertilizing	Experiment implementation
<b>Soybeans</b>	Nov. 2009/Apr. 2010	240 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Apr. 2010
<b>Radish</b>	May to Aug. 2010	Without fertilizing	Cover crop
<b>Corn</b>	Out. 2010/Feb. 2011	190 kg ha <sup>-1</sup> of N (20 kg ha <sup>-1</sup> starter and 170 kg ha <sup>-1</sup> broadcast), 120 kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and 120 kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O	Evaluation: Feb. 2011
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2011	Without fertilizing	Cover crop
<b>Soybeans</b>	Nov. 2011/Mar. 2012	240 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2012
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2012	Without fertilizing	Cover crop
<b>Soybeans</b>	Nov. 2012/Mar. 2013	240 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2013
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2010	220 kg ha <sup>-1</sup> of 5-25-25 formulated and 40 kg ha <sup>-1</sup> of N	Evaluation: Nov. 2013 It was not evaluated by harvest problems
<b>Soybeans</b>	Nov. 2013/Mar. 2014	220 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	
<b>Experiment III</b>			
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2011	Without fertilizing	Experiment implementation
<b>Soybeans</b>	Nov. 2011/Mar. 2012	210 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	It was not evaluated
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2012	210 kg ha <sup>-1</sup> of 5-25-25 formulated and 40 kg ha <sup>-1</sup> of N	Evaluation: Nov. 2012
<b>Soybeans</b>	Nov. 2012/Mar. 2013	210 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2013
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2013	210 kg ha <sup>-1</sup> of 5-25-25 formulated and 40 kg ha <sup>-1</sup> of N	Evaluation: Nov. 2013
<b>Soybeans</b>	Nov. 2013/Mar. 2014	210 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2014
<b>Experiment IV</b>			
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2011	Without fertilizing	Experiment implementation
<b>Soybeans</b>	Nov. 2011/Mar. 2012	230 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	It was not evaluated
<b>Wheat</b>	Jul. to Nov. 2012	220 kg ha <sup>-1</sup> of 5-25-25 formulated and 45 kg ha <sup>-1</sup> of N	Evaluation: Nov. 2012
<b>Soybeans</b>	Nov. 2012/Mar. 2013	220 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	Evaluation: Mar. 2013
<b>Black oats</b>	May to Sept. 2013	Without fertilizing	Cover crop
<b>Soybeans</b>	Nov. 2013/Mar. 2014	230 kg ha <sup>-1</sup> of 2-20-20 formulated (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	It was not evaluated

**Table 2. Chemical attributes evaluated before initiation of the experiments for the four experimental areas.**

Depth.(m)	pH <sub>H2O</sub>	Al <sup>+3</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	CTC <sub>pH7.0</sub>	P	S	BS	Al Sat	Clay
<b>Experiment I (Carazinho)</b>											
				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			---mg dm <sup>-3</sup> ---		-----%-----		g kg <sup>-1</sup>
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
<b>Experiment II (Carazinho)</b>											
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
<b>Experiment III ( São Miguel das Missões)</b>											
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
<b>Experiment IV ( Tupanciretã)</b>											
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	12.7	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<sup>+3</sup>- Aluminum, Ca<sup>+2</sup>- Calcium, Mg<sup>+2</sup>- Magnesium, K<sup>+2</sup>- Potassium, CTC<sub>pH7.0</sub>- Cations Exchange Capacity at pH 7.0, P- Phosphorus, S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>- Sulfur, BS- Base Saturation, Al Sat- Saturation by Al<sup>+3</sup>.

**Table 3: Total, normal and ideal precipitation (mm) during the crop cycle and the critical growth period of crops in Experiments I, II, III and IV. Source: INMET.**

Year	Crop	Precipitation during the Cycle				Precipitation during the Critical Period				
		Obs.	Norm.	Ideal	Classif. <sup>†</sup>	Obs.	Norm.	Ideal	Bal. <sup>§</sup>	Classif. <sup>†</sup>
<b>Experiment I</b>										
2009/10	Corn	1249	706	765	Higher	465	218	300	+165	Higher
2010/11	Soybeans	808	688	675	Higher	250	232	300	-50	Lower
2011/12	Soybeans	401	688	675	Lower	238	232	300	-62	Lower
2012/13	Corn	730	688	765	Lower	200	232	300	-100	Lower
2013	Wheat	935	766	507	Higher	457	319	195	+262	Higher
2013/14	Soybeans	770	706	675	Higher	368	232	300	+68	Higher
<b>Experiment II</b>										
2009/10	Soybeans	1212	1460	675	Higher	381	233	300	+81	Higher
2010/11	Corn	842	706	765	Higher	217	218	300	-83	Lower
2011/12	Soybeans	401	688	675	Lower	238	233	300	-62	Lower
2012/13	Soybeans	680	688	675	Higher	200	233	300	-100	Lower
2013	Wheat	936	766	507	Higher	458	320	195	+263	Higher
<b>Experiment III</b>										
2012	Wheat	873	611	507	Higher	164	252	195	-31	Lower
2012/13	Soybeans	998	660	675	Higher	232	215	300	-68	Lower
2013	Wheat	629	623	507	Higher	221	252	195	+26	Higher
2013/14	Soybeans	671	660	675	Lower	226	215	300	-74	Lower
<b>Experiment IV</b>										
2012	Wheat	810	646	507	Higher	266	284	195	+71	Higher
2012/13	Soybeans	842	599	675	Higher	134	188	300	-66	Lower

<sup>†</sup>The classification is a relationship between the observed and ideal rainfall when the observed precipitation was below the ideal, the classification is Lower, when the observed precipitation was above the ideal classification is Higher. <sup>§</sup>It is a difference between the observed precipitation during the critical period and the ideal precipitation in the same period.

**Table 4: Regression between BS and Al<sup>3+</sup> saturation with rates of isolated gypsum for Experiment I and Experiment II after 56 months and 30 months after the application of gypsum combined with lime in Experiments III and IV.**

Rates	Depth (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	
	BS	Al Sat.	BS	Al Sat.	BS	Al Sat.	BS	Al Sat.	BS	Al Sat.	BS	Al Sat.
<b>Experiment I</b>												
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
<b>Effect</b>	ns	n/Al	ns	n/Al	Q*	Q*	ns	ns	Q*	Q*	Q**	Q*
<b>R<sup>2</sup></b>	-	-	-	-	<b>0.62</b>	<b>0.82</b>	-	-	<b>0.75</b>	<b>0.73</b>	<b>0.80</b>	<b>0.84</b>
<b>Experiment II</b>												
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
<b>Effect</b>	Q*	n/Al	Q*	n/Al	ns	n/Al	Q*	n/Al	Q**	Q**	Q*	Q**
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.85</b>	-	<b>0.78</b>	-	-	-	<b>0.77</b>	-	<b>0.94</b>	<b>0.98</b>	<b>0.89</b>	<b>0.99</b>
<b>Experiment III</b>												
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
<b>Effect</b>	L**	ns	L*	L*	Q*	Q*	Q*	Q*	L**	Q*	L**	ns
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.95</b>	-	<b>0.80</b>	<b>0.82</b>	<b>0.94</b>	<b>0.83</b>	<b>0.93</b>	<b>0.92</b>	<b>0.85</b>	<b>0.95</b>	<b>0.87</b>	-
<b>Experiment IV<sup>§</sup></b>												
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
<b>Effect</b>	ns	n/Al	ns	n/Al	ns	ns	Q*	ns	Q*	L*	L*	L**
<b>R<sup>2</sup></b>	-	-	-	-	-	-	<b>0.95</b>	-	<b>0.94</b>	<b>0.92</b>	<b>0.89</b>	<b>0.98</b>

NS: not significant; n / Al: no Aluminum; L: significant for linear regression; Q: significant for quadratic regression; \* Significant at  $p < 0.05$ ; \*\* Significant at  $p < 0.01$ ; <sup>§</sup>Average of repetitions for treatments with gypsum and 3.6 Mg ha<sup>-1</sup> of lime, treatment that provided better results in the soil profile.



## 8. ARTIGO IV – FORMAÇÃO DA CAMADA DE ENRAIZAMENTO COMO ALTERNATIVA PARA ATENUAR OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA E MILHO

### 8.1. Resumo

Déficits hídricos de curta duração têm sido um dos principais fatores causadores de redução da produtividade das culturas em Latossolos com subsolo ácido no sul do Brasil. Este estudo teve o objetivo de investigar o efeito da melhoria da qualidade química da camada de enraizamento, pelo uso do gesso combinado com o calcário, sobre a produtividade de soja e milho em sistema plantio direto (SPD) contínuo com presença ou não da exclusão da precipitação. O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho distrófico em São Miguel das Missões no Rio Grande do Sul (RS) com delineamento experimental de parcelas subdivididas com três repetições. As parcelas principais foram compostas pelos seguintes tratamentos: 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário(T0); 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário(T1); 3,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário(T2); 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário(T3). Nas safras de soja (2014/15) e milho (2015/16) os tratamentos foram subdivididos e as subparcelas foram submetidas a presença ou ausência da exclusão de 100% da precipitação pluvial durante o período crítico das culturas (30 dias de exclusão para a soja e 20 dias para o milho). As amostragens de solo foram estratificadas na camada de 0,00-0,60 m. A adição de gesso combinada ao calcário proporcionou incremento na saturação por bases (SB) e redução na saturação por alumínio (Al<sup>3+</sup>) nas camadas subsuperficiais, já a aplicação ou reaplicação de calcário apenas afetou a camada superficial do solo (0,00-0,10 m). O gesso combinado ao calcário proporcionou aumento da produtividade das culturas com ou sem exclusão da precipitação, porém, na presença da exclusão o efeito dos insumos foi mais evidente, incrementando 46% da produtividade acumulada de ambas as safras. O gesso combinado ao calcário supriu a presença de exclusão hídrica. Os parâmetros de crescimento de plantas foram afetados com a presença da exclusão hídrica. Com a exclusão da precipitação houve relações entre o aumento da produtividade e a melhoria dos atributos químicos em camadas mais profundas do solo (0,10-0,25 m). A melhoria química de uma camada espessa foi uma estratégia eficiente para mitigação do efeito do déficit hídrico sobre a produtividade das culturas de grãos.

**Palavras-chave:** Gesso. Calcário. Restrição hídrica. Camadas subsuperficiais.

## 8.2. Introdução

O Sistema Plantio Direto (SPD) tem provocado diversas melhorias na qualidade química e física do solo de áreas agrícolas de diferentes regiões do Brasil (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008). Ainda, a utilização de cultivares mais precoces e mais produtivas e o maior uso de adubos e corretivos tem proporcionado a obtenção de produtividades cada vez mais elevadas das principais culturas agrícolas de grãos (DALLA NORA et al., 2014). Os resultados positivos obtidos sob SPD têm resultado em uma rápida expansão do sistema que alcança uma área próxima a 32 milhões de hectares na atualidade (CAIRES, 2012; ANJOS et al., 2012). Contudo, os frequentes déficits hídricos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul (RS) têm ocasionado ao menos quatro quebras de safra nos últimos 10 anos, com maior destaque para as safras de 2004/05 e 2011/12 que resultaram em redução próxima a 30% da produção agrícola (EMATER, 2012). De acordo com Bergamaschi e Matzenauer (2014) somente o déficit hídrico verificado na safra de 2004/05, resultou em uma perda de 9,0 milhões de toneladas de grãos (LSPA, 2008).

Associada a restrição hídrica, a ocorrência de impedimentos químicos e físicos tem reduzido o aprofundamento do sistema radicular das culturas, intensificando os efeitos deletérios sobre produtividade de grãos (DENARDIN et al., 2008; WINGEYER et al., 2015). A dificuldade de provocar melhorias químicas nas camadas subsuperficiais sob SPD se dá pela lenta movimentação vertical do calcário quando não realizada a incorporação mecânica (BORTOLUZZI et al., 2014). Notadamente, sob Latossolos ácidos a aplicação superficial de calcário, em doses reduzidas e espaçadas em intervalos longos de tempo, geralmente resulta na formação de um perfil com acentuado gradiente vertical de qualidade química entre a camada superficial e o subsolo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008; CAIRES, 2013; BORTOLUZZI et al., 2014; DALLA NORA et al., 2014).

A barreira química ao aprofundamento do sistema radicular, induzida pelo elevado teor de alumínio ( $Al^{3+}$ ) e baixo teor de cálcio ( $Ca^{2+}$ ), compromete a eficiência no uso da água armazenada no solo, e por isto, intensifica o impacto de estresse hídrico de curta duração sob a produtividade das culturas (MARENCO et al., 2007; JORIS et al., 2013; DALLA NORA et al., 2014; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Assim, a ocorrência de gradiente vertical de qualidade química na camada de enraizamento (CE) contribui para a instabilidade temporal da produtividade em regiões tropicais (DALLA NORA et al., 2014).

Como alternativa para redução dos efeitos da barreira química verificada em Latossolos sob SPD, a aplicação combinada do gesso e calcário tem revelado um efeito de interação entre os produtos, com resultados superiores ao efeito isolado de cada insumo (RAIJ, 2010; DALLA

NORA et al., 2014). Ao passo que o calcário eleva o pH, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) na superfície do solo, o gesso, insumo de maior solubilidade que o calcário, se dissocia liberando Ca e sulfato ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) (RAIJ, 2010). Com isso, há uma rápida lixiviação do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  para as camadas mais profundas do perfil, que ao se movimentar verticalmente, favorece a movimentação de cátions como é o caso do  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e em menor quantidade o potássio ( $\text{K}^+$ ) (RAIJ, 2010). Além disso, ocorre a formação do complexo  $\text{AlSO}_4^+$  que possui menor atividade e, conseqüentemente, tem seu efeito tóxico reduzido, favorecendo o desenvolvimento radicular das culturas (DALLA NORA; AMADO, 2013; BLUM et al., 2014; WATTS; DICK, 2014).

Estudos conduzidos no Brasil por Caires et al. (2005; 2011), Souza et al. (2012), Caires (2013), Dalla Nora e Amado (2013), Blum et al (2014) e Pauletti et al (2014), e também nos Estados Unidos (USA) (CHEN et al., 2008; WATTS; TORBERT, 2009; CHEN; DICK, 2011; WATTS; DICK, 2014) reportaram que o uso de gesso promoveu o incremento na produtividade das culturas de grãos, especialmente em condições de déficit hídrico. Resultados reportados por Joris et al. (2013), demonstraram que a redução da toxicidade do  $\text{Al}^{3+}$  pela aplicação de calcário e gesso diminui o efeito deletério do mesmo sobre as culturas, especialmente, quando foi constatado estresse hídrico.

Apesar da frequência com que fenômenos de estiagem assolam a economia do RS, a capacidade da melhoria química da camada de enraizamento em suprir a redução da precipitação não está bem definida ou quantificada para o Estado. Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo foi de investigar o efeito da melhoria da qualidade química da camada de enraizamento, pelo uso do gesso combinado com o calcário, sobre a produtividade de soja e milho em SPD contínuo com presença ou não da exclusão da precipitação.

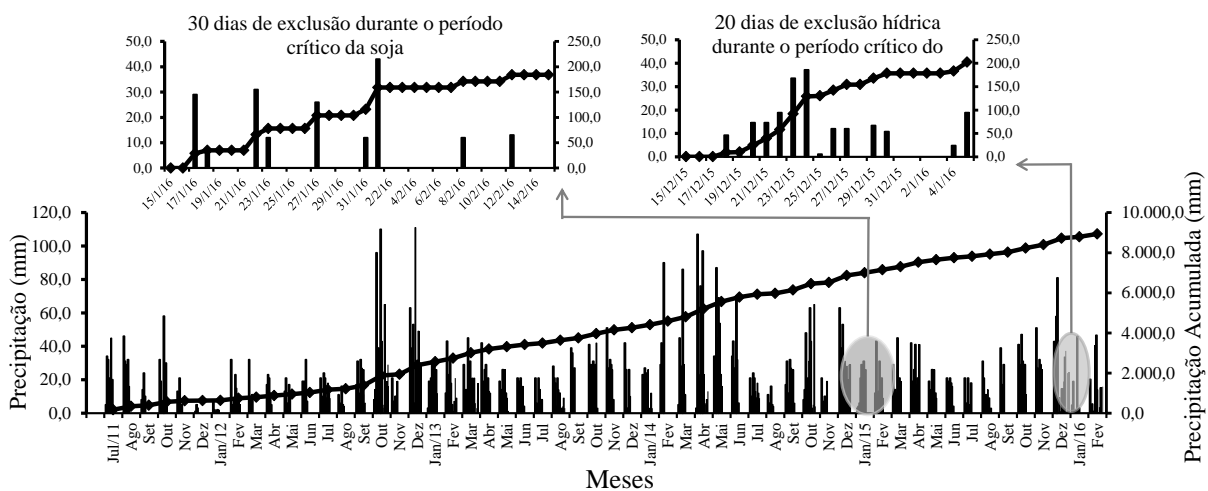
### **8.3. Material e Métodos**

#### **8.3.1. Descrição da área de estudo**

A área experimental localiza-se em um Latossolo manejado sob SPD por longo prazo em São Miguel das Missões no Estado do RS. O experimento situa-se nas coordenadas de  $28^{\circ}40'S$  e  $54^{\circ}23'O$ , altitude de 265 m com precipitação pluvial anual de 1651 mm e temperatura média anual de  $15,0^{\circ}\text{C}$ . 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 está representada na Figura 1.

A área experimental tem sido manejada sob SPD a mais de 15 anos sendo usadas comercialmente para produção de grãos, e recebendo doses próximas a  $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 75%, aplicadas espaçadamente em interstícios de cinco anos. A área tem recebido a sucessão de culturas com soja e milho durante o verão e trigo ou culturas de cobertura durante o inverno. Antecedendo os tratamentos a área experimental foi cultivada com a cultura da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), a qual foi quimicamente manejada com glyphosate [N-(phosphonomethyl) glycine].

Figura 1 - Precipitação diária e acumulada desde a implantação do experimento e precipitação ao longo do período de exclusão da precipitação durante os períodos críticos da soja e milho.



Fonte: Dalla Nora (2017)

A cultura da soja na safra 2014/15 recebeu  $240 \text{ kg ha}^{-1}$  de 2-20-20 como adubação. Para a cultura do milho na safra de 2015/16 a fertilização foi realizada com  $190 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrogênio (N) ( $20 \text{ kg ha}^{-1}$  N na semeadura e  $170 \text{ kg ha}^{-1}$  N parcelado em duas aplicações em cobertura),  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de P e  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de K. A fonte de N foi uréia ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) (45% de N), a fonte de fósforo (P) foi superfosfato triplo  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (21% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), e a fonte de  $\text{K}^+$  foi cloreto de potássio (KCl) (60% de  $\text{K}_2\text{O}$ ).

Os cultivares e híbridos usados no estudo foram modernos e de alta performance, para o milho foi usado o híbrido Pioneer 30K75 e para soja a cultivar Nidera 6909 IPRO. O milho foi semeado na taxa de  $4,0$  sementes  $\text{m}^{-1}$  com um espaçamento entre linhas de  $0,50 \text{ m}$ ; a soja foi semeada na taxa de  $12,0$  sementes  $\text{m}^{-1}$  (inoculada com *Bradyrhizobium japonicum*) com um espaçamento entre linhas de  $0,50 \text{ m}$ .

A caracterização química inicial foi realizada anteriormente a implantação do experimento a partir da coleta de cinco sub-amostras tomadas aleatoriamente na 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 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. Na Tabela 1 estão apresentados os atributos químicos analisados conforme metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

Tabela 1 - Atributos químicos do solo avaliados antes da implantação dos tratamentos em um Latossolo distrófico manejado sob sistema plantio direto no RS.

Prof.	pH <sub>H2O</sub>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>3+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	CTC <sub>pH7,0</sub>	H+Al	P	S	SB	Sat. Al	Argila	MO S
(m)		-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----							---mg dm <sup>-3</sup> ---		-----%-----		-----g Kg <sup>-1</sup> -----
0,00-0,05	5,0	0,5	4,5	2,8	0,46	16,2	8,4	29,2	4,9	54,4	5,6	420	3,3
0,05-0,10	4,6	1,2	3,1	3,1	0,23	13,4	6,9	6,8	2,3	43,1	15,3	600	2,6
0,10-0,15	4,3	1,8	1,9	1,2	0,15	14,8	11,5	3,6	1,1	27,7	29,9	650	2,5
0,15-0,25	4,2	2,5	1,5	1,7	0,09	13,2	9,9	2,4	6,2	21,0	42,3	770	2,3
0,25-0,40	4,2	2,4	1,4	1,6	0,06	11,6	8,5	1,6	4,7	23,3	43,2	750	1,9
0,40-0,60	4,2	2,1	1,2	1,4	0,06	11,5	8,8	1,8	1,6	23,8	43,3	650	1,2

Fonte: Dalla Nora (2017); Al<sup>3+</sup>- Alumino, Ca<sup>2+</sup>- Cálcio, Mg<sup>2+</sup>- Magnésio, K<sup>2+</sup>- Potássio, CTC<sub>pH7,0</sub>- Capacidade de troca de cátions a pH 7,0, P- Fósforo, S- Enxofre, SB- Saturação por bases, Sat. Al- Saturação por Al., MOS- Matéria orgânica do solo.

### 8.3.2. Definição dos tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com parcelas subdivididas e três repetições. Cada parcela experimental possuía área de 64 m<sup>2</sup>, com dimensões de 8,0 x 8,0 m. As parcelas principais consistiram dos seguintes tratamentos: 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (T0); 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (T1); 3,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 3,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (T2); 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (T3). As subparcelas consistiram da inclusão do tratamento da restrição de 100% da precipitação (no período crítico das culturas) e do tratamento sem exclusão da precipitação.

O gesso foi aplicado no mês de agosto de 2011. O calcário foi aplicado em abril de 2013 (2,0 Mg ha<sup>-1</sup>) e reaplicado em março de 2015 (2,0 Mg ha<sup>-1</sup>) totalizando 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> no período de dois anos. O gesso agrícola (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) utilizado nos experimentos continha em sua composição 210,0 g kg<sup>-1</sup> de Ca<sup>2+</sup>, 155,0 g kg<sup>-1</sup> de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 0,024 g kg<sup>-1</sup> de F<sup>-</sup> e 9,0 g kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. O calcário dolomítico continha 30% de CaO e 20% de MgO com 75% de PRNT e 85% de reatividade.

A dose de gesso média foi tomada como dose de referência, sendo determinada de acordo com o teor de argila na camada de 0,20-0,40 m, seguindo a equação (1) (QUAGGIO; RAIJ, 1996), onde: NG= argila x 6,0.

**NG= argila x 6,0**

**Equação (1)**

NG = necessidade de gesso em  $\text{kg ha}^{-1}$ ; Argila = teor de argila no solo  $\text{g kg}^{-1}$ .

As demais doses de gesso foram determinadas como valores acima e abaixo da dose de referência, com o intuito de ajustar uma dose ideal para as condições de cada experimento.

A dose de calcário foi estabelecida com o objetivo de atingir 65% de SB na camada de 0,00-0,20 m.

### 8.3.3. Avaliação da exclusão da precipitação

Foram instaladas câmaras de exclusão da precipitação sobre a cultura da soja na safra de 2014/15 e da cultura do milho na safra de 2015/16. As câmaras consistiram de estruturas de madeira recobertas com plástico que excluía 100% da precipitação pluvial ocorrida na área. Para isolamento lateral foram enterradas faixas de plástico ao entorno da câmara evitando a entrada da água lateralmente por escoamento horizontal. Para a cultura da soja a exclusão de 100% da precipitação ocorreu em um período de 30 dias entre 15 de janeiro de 2015 e 15 de fevereiro de 2015 correspondentes ao período de plena floração a meados do enchimento de grãos (Figura 1). Para a cultura do milho a exclusão da precipitação foi realizada durante 20 dias correspondentes ao início da floração ao início do enchimento de grãos (Figura 1).

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. Nesse contexto, optou-se por considerar uma exclusão próxima de 50% do período correspondente ao período crítico (20 dias). De acordo com Bergamaschi et al. (2007), as melhores respostas em produtividade da cultura da soja são obtidas com 300 mm no período crítico de 60 dias correspondentes da floração ao enchimento de grãos da cultura. Dessa forma, foi realizada a exclusão da precipitação de 50% do período considerado crítico (30 dias).

### 8.3.4. Descrição das principais avaliações realizada nas áreas experimentais

O solo coletado posteriormente a aplicação dos tratamentos 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. As amostragens de solo foram realizadas 30 meses após a implantação do experimento (30 meses após a aplicação de gesso e 12 meses após a aplicação de calcário) em setembro de 2012, e após 54 meses da implantação do experimento (54 meses após a aplicação de gesso e 12 meses após a reaplicação de calcário) em dezembro de 2015.

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  $\text{Al}^{3+}$  extraído com  $\text{KCl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$  e titulado com  $\text{NaOH}$  0,0125 mol  $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  extraídos com  $\text{KCL}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$  e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, P e  $\text{K}^{+}$  extraídos com solução de Mehlich-I. A concentração de P foi determinada por colorimetria usando molibdato de amônio e o teor de  $\text{K}^{+}$  foi determinado por fotometria de chama. A determinação do teor de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  foi realizada a partir da extração com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{CH}_2\text{O}$  (500 mg  $\text{L}^{-1}$  de P).

No período do florescimento das culturas agrícolas foi realizada a coleta de tecido foliar para realização das análises químicas de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre de acordo com metodologias descritas em Tedesco et al. (1995).

Na maturação fisiológica das culturas agrícolas, 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 plantio), e a massa de grãos corrigida para umidade de 13%.

A partir dos cultivos agrícolas implantadas no verão de 2013, foi realizada a medição do índice de área foliar (IAF) e determinação do índice de vegetação (IV) chamado de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

O IAF foi medido com ajuda do sensor LAI (LAI-2200, Plant Canopy Analyzer), esse equipamento é um sensor de reflectância que determina a área recoberta por plantas a partir da diferença entre a luz do ambiente que incide sobre o dossel das plantas pela luz que atinge a superfície do solo. Diversos estudos apontam o IAF como uma ferramenta importante para prever a capacidade de fotossíntese e crescimento da planta, além disso, esse índice pode ser medido com ajuda de sensores (XUE et al., 2004; EL-SHIKHA et al., 2007).

A determinação do NDVI foi realizada com auxílio do sensor Green Seeker (Trimble, Sunnyvale, Califórnia, EUA). O NDVI corresponde a características espectrais correspondentes a vegetação da planta considerando fatores como IAF e biomassa.

Foi realizada a avaliação dos componentes de produtividade da cultura da soja legumes por planta, grãos por legume e peso de 1000 grãos. Os componentes de produtividade avaliados

na cultura do milho foram número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira e peso de 1000 grãos.

A umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) foi determinada a partir da coleta de amostras indeformadas para determinação da umidade gravimétrica (U) e por anéis volumétricos a fim de determinar a densidade do solo ( $D_s$ ). As amostras foram coletadas nas mesmas profundidades utilizadas na quantificação dos atributos químicos. A  $\theta$  foi determinada segundo a equação (2):

$$\theta = U \times D_s \quad \text{Equação (2)}$$

$\theta$  = umidade volumétrica do solo em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; U = umidade gravimétrica do solo em  $\text{g g}^{-1}$ .

A U foi determinada segundo a equação (3):

$$U = (M_u - M_s)/(M_s) \quad \text{Equação (3)}$$

U = umidade gravimétrica do solo em  $\text{g g}^{-1}$ ;  $M_u$  = massa de solo úmido em g;  $M_s$  = massa de solo seco em g.

A  $D_s$  foi determinada segundo a equação (4):

$$D_s = M_s/V_t \quad \text{Equação (4)}$$

$D_s$  = densidade do solo em  $\text{g cm}^{-3}$ ;  $M_s$  = massa de solo em g;  $V_t$  = volume total a partir das medidas do anel em  $\text{cm}^3$ .

### 8.3.5. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (Anova) 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 os tratamentos com a SB e saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , saturação por  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , relação Ca/Al e produtividade as médias foram submetidas ao teste F e comparadas pelo Teste de Tukey. Quando houve efeito significativo entre os tratamentos com e sem exclusão da precipitação com a umidade do solo as médias foram submetidas ao teste F. A associação entre os atributos de solo e a produtividade, além dos atributos de planta e produtividade foi identificada mediante o uso de análise estatística multivariada - Análise Fatorial/Análise de Componente Principal (AF/ACP). Para a análise dos dados utilizou-se o Software SPSS (Statistical Package Social Science) versão 20,0. A AF/ACP demandou de três etapas: a primeira consistiu no preparo da matriz de correlação [R]; a segunda



na extração dos fatores comuns e da possível redução de variáveis explicativas e, por último, na rotação dos eixos relativos aos fatores comuns, simplificando a solução. As comunalidades e os autovalores para construção do gráfico bi plote foram obtidos após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser.

## 8.4. Resultados e Discussão

### 8.4.1. Caracterização inicial dos atributos químicos quando da implantação dos experimentos

A presença de  $\text{Al}^{3+}$  e o baixo teor de  $\text{Ca}^{2+}$  e outras bases nas camadas subsuperficiais do solo manejado sob SPD cria uma barreira química ao aprofundamento do sistema radicular (SHAINBERG et al., 1989; CAIRES et al., 2008; DALLA NORA; AMADO, 2013). No presente experimento, a presença do gradiente de qualidade química na CE foi identificada já na camada superficial (a partir dos 0,05 m) (Tabela 1). Este resultado deve-se a aplicação de doses reduzidas de calcário em longos intervalos de tempo, sendo, neste caso, insuficiente até mesmo para a correção da camada superficial (0,00-0,10 m), não compensando os processos de reacidificação (LIU; HUE, 2001; CAIRES, 2008; 2013). A transição abrupta da qualidade química na CE, especialmente quando associada a presença de  $\text{Al}^{3+}$  no subsolo, é um fator limitante a produtividade das culturas (REEVE; SUMNER, 1972; NAVA et al., 2012; PAULETTI et al., 2014; MASSUD et al., 2015) o qual se agrava quando da ocorrência de déficits hídricos durante o período crítico de desenvolvimento da cultura (HATFIELD, 2001; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

No Sul do Brasil a recomendação de uso do calcário no SPD é baseada em uma camada superficial do solo (0,00-0,10 m) com as seguintes características de acidez:  $\text{pH H}_2\text{O} < 5,5$ ;  $\text{SB} < 65\%$  e saturação por  $\text{Al}^{3+} > 10\%$  (CQFS-RS/SC, 2004). Com base nestes critérios, a área experimental apresentava todos estes atributos químicos abaixo dos valores críticos (Tabela 1), sugerindo elevada probabilidade de resposta ao uso do corretivo.

Quanto à prescrição do uso do gesso em Latossolos do Brasil Central, Sousa e Lobato (2002) sugeriram como teores críticos os valores de  $\text{Ca}^{2+} < 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e de saturação por  $\text{Al}^{3+} > 20\%$  na camada de 0,20-0,40 m. Nesse estudo, o solo do apresentava saturação por  $\text{Al}^{3+}$  acima do teor crítico sugerindo elevada probabilidade de resposta ao insumo (Tabela 1).

#### 8.4.2. Melhoria dos atributos químicos com aplicação de gesso e calcário

Aos 30 e 54 meses após a aplicação dos tratamentos praticamente todo o  $S-SO_4^{2-}$  proveniente da aplicação do gesso foi lixiviado das camadas superficiais do solo (0,00-0,10 m). Esse resultado deve-se a elevada mobilidade do  $S-SO_4^{2-}$  no perfil do solo, associado ao fato deste nutriente estar em sua forma oxidada ( $S-SO_4^{2-}$ ) no gesso, a qual é repelida pelas cargas da superfície dos argilominerais, permanecendo na solução do solo e susceptível ao deslocamento pela água de drenagem (FARINA et al., 2000; CAIRES et al., 2011; NAVA et al., 2012). Em estudos anteriores, Caires et al. (2011) reportaram elevada migração do  $S-SO_4^{2-}$  das camadas superficiais para as camadas mais profundas do solo.

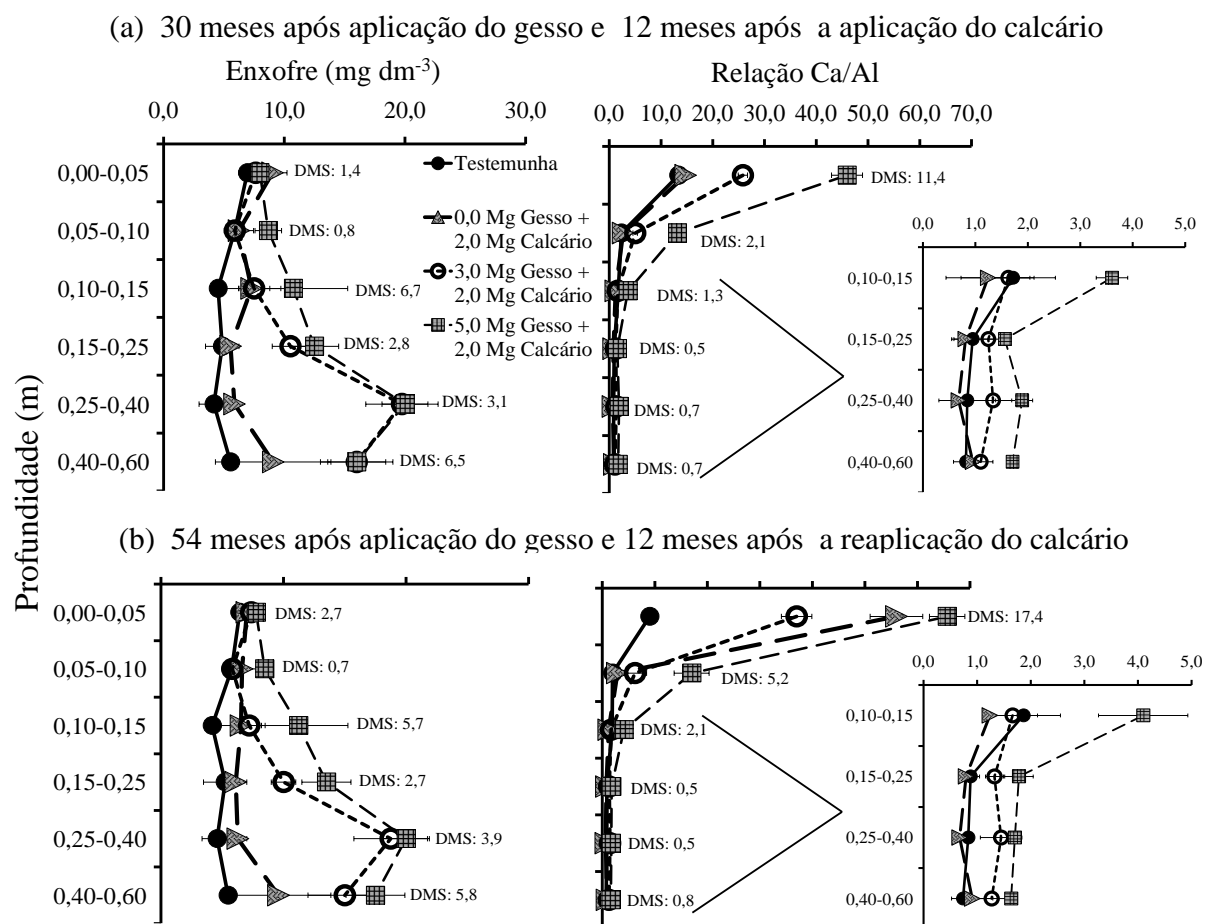
Os incrementos significativos e mais pronunciados de  $S-SO_4^{2-}$  foram identificados nas camadas de 0,15-0,25 m e 0,25-0,40 m para os tratamentos que receberam gesso (Figura 2a e 2b). Quando o calcário foi aplicado isoladamente não foi verificado incremento dos teores de  $S-SO_4^{2-}$  em relação ao tratamento testemunha para nenhuma profundidade do solo. O tratamento T3 apresentou incremento de 160 e 155% aos 30 meses e 387 e 160% aos 54 meses para as camadas de 0,15-0,25 m e 0,25-0,40 m, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha.

Com o incremento de  $Ca^{2+}$  proveniente do gesso e do calcário, associado a neutralização do  $Al^{3+}$  pelo calcário e a formação de  $AlSO_4^+$ , por conta do gesso, houve aumento da relação Ca/Al no solo tornando a ambiente mais favorável para o desenvolvimento radicular. Para o tratamento que recebeu apenas calcário (T1), somente aos 54 meses, quando a segunda dose de calcário foi aplicada ( $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), foi verificada aumento significativo ( $p < 0,05$ ) da relação Ca/Al, porém esse aumento ficou restrito nas camadas superficiais do solo (0,00-0,10 m) (Figura 2b).

Por outro lado, enquanto o tratamento T0, aos 30 meses após a implantação do experimento, apresentou a relação Ca/Al de 13,4, no tratamento T3 foi de 45,9 na camada de 0,00-0,05. Já, na camada de 0,10-0,15 m a relação foi de 1,7 e 3,6, respectivamente, para os tratamentos T0 e T3 (Figura 2a). Para os respectivos tratamentos, aos 54 meses após a implantação do experimento, 12 meses após o calcário ser reaplicado, a relação passou de 9,0 para 68,6 na camada de 0,00-0,05 m e de 1,9 para 4,1 na camada de 0,10-0,15 m (Figura 2b).

De acordo com Cronan e Grigal (1995) a relação Ca/Al pode ser usada como indicadora de processos que contribuem para a acidificação do solo, porém, poucos estudos foram desenvolvidos buscando relacionar este índice com a produtividade.

Figura 2 - Teor de Enxofre e relação Ca/Al 30 meses após a aplicação de gesso e 12 meses após a aplicação calcário (a) e após 54 meses da aplicação de gesso e 12 meses após a reaplicação de calcário (b). Diferença mínima estatística (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



Fonte: Dalla Nora (2017)

De acordo com a CQFS/RS-SC (2004), o valor crítico da SB é 65% na camada de 0,00-0,10 m, para o experimento em questão, nenhum tratamento atingiu esse índice, mesmo após a reaplicação do calcário (Figura 3). O tratamento T3 atingiu valores superiores ao limite crítico apenas na camada de 0,00-0,05 m em ambas as avaliações realizadas. Para essa camada, o tratamento T3 apresentou incremento significativo ( $p < 0,05$ ) de 32 e 47% em relação ao tratamento testemunha (T0), aos 30 e 54 meses, respectivamente (Figura 3). Nas camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,25 m, esse incremento foi de 62 e 42% para os respectivos tratamentos aos 54 meses após implantação do experimento (Figura 3b).

Com relação a saturação por Al, apenas os tratamentos que receberam 3,0 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso combinados ao calcário apresentaram valores inferiores a 10% na camada de 0,00-0,10 m (limite crítico proposto pela CQFS/RS-SC, 2004) aos 30 e 54 meses após a implantação do experimento (Figura 3). Aos 54 meses, o tratamento T3 apresentou redução significativa

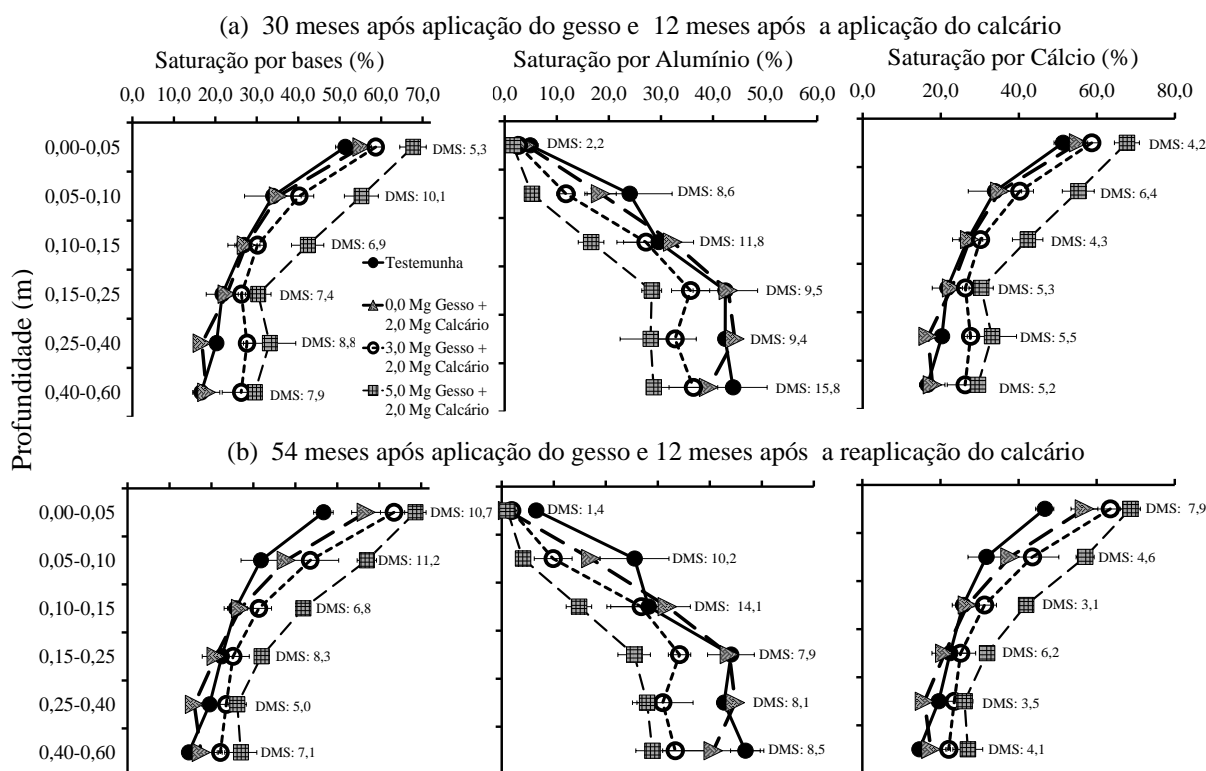
( $p < 0,05$ ) em relação ao tratamento T0 na camada média de 0,00-0,10 m (média entre as camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m) (Figura 3b), atingindo o valor de 3,0%. Para as camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,25 m, a redução da saturação por  $\text{Al}^{3+}$  do tratamento T3 em relação ao T0 foi de 47 e 42%, respectivamente.

Em estudo realizado por Caires et al. (2011), os autores observaram que a aplicação de doses de gesso em um Latossolo sem presença de  $\text{Al}^{3+}$  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 em SPD de longa duração, sendo esta uma importante estratégia de nutrição de plantas sob condições de déficit hídrico, estimulando o aprofundamento do sistema radicular e equilibrando as bases no complexo de troca.

De acordo com Nava et al. (2012), essa mobilidade do  $\text{Ca}^{2+}$  associado ao uso do gesso deve-se ao efeito do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  em anular a carga do  $\text{Ca}^{2+}$ , resultando na formação do par iônico neutro entre esses íons impedindo que o  $\text{Ca}^{2+}$  ligue-se a outras cargas do solo. Em relação a saturação por  $\text{Ca}^{2+}$ , ambas as épocas coletadas apresentaram resultados similares (Figura 3). Para o tratamento T1, que recebeu apenas calcário, somente após a reaplicação do insumo (54 meses) foi verificado aumento significativo de 65% em relação ao tratamento testemunha T0 para a camada de 0,00-0,05 m. Nas demais camadas não foi verificado aumento significativo (Figura 3b).

Para o tratamento T3, 54 meses após implantado o experimento, foi observado aumento significativo de 65, 72 e 26% nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,10-0,15 e 0,15-0,25 m, respectivamente, em relação ao tratamento T0 (Figura 3b). Este resultado é relevante uma vez que o  $\text{Ca}^{2+}$  proveniente do calcário quando aplicado na superfície raramente alcança camadas profundas (BORTULUZZI et al., 2014). O incremento nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  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  $\text{Ca}^{2+}$  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).

Figura 3 – Saturação por base, saturação por Al e saturação por Ca 30 meses após a aplicação de gesso e 12 meses após a aplicação calcário (a) e após 54 meses da aplicação de gesso e 12 meses após a reaplicação de calcário (b). Diferença mínima estatística (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



Fonte: Dalla Nora (2017)

#### 8.4.3. Efeitos do gesso e calcário sobre o crescimento das plantas com exclusão ou não da precipitação

Com intuito de verificar a eficácia das câmaras de exclusão da precipitação foi determinada a umidade volumétrica do solo nas parcelas que receberão exclusão da precipitação e nas parcelas que não receberão (Tabela 2). Com isso, foi verificado que a maioria das camadas nos tratamentos avaliados apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre a presença ou não da exclusão, sendo que as parcelas com presença das câmaras de exclusão apresentaram, em geral, valores inferiores de  $\theta$  em ambas as safras avaliadas, comprovando a eficiência da metodologia. A redução da umidade na superfície do solo induz às plantas a realocarem fotoassimilados para as raízes, com isso há melhor aproveitamento da água do solo armazenada em camadas mais profundas (SHAINBERG et al., 1989). Contudo, isso será possível apenas na ausência de camadas compactadas ou acidez em subsuperfície.

Para a camada superior (0,00-0,05 m), os tratamentos T0, T1, T2 e T3 com exclusão da precipitação foram 38, 50, 53 e 37% superiores ( $p < 0,05$ ) aos tratamentos sem exclusão da precipitação, respectivamente, durante a safra de soja de 2014/15 (Tabela 2). Para a camada de 0,15-0,25 m, os respectivos tratamentos com exclusão da precipitação foram 18, 26, 30 e 20% superiores aos tratamentos sem exclusão. Para a safra de milho de 2015/16 os resultados foram semelhantes aos mencionados anteriormente. Esses resultados reiteram 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., 2014).

Ainda, foi observado que as camadas mais profundas do perfil do solo apresentam aumento da umidade quando comparadas às camadas superficiais, mesmo na presença da exclusão da precipitação (Tabela 2). Nesse contexto, a transição abrupta da qualidade química na camada de enraizamento é um fator considerado prejudicial para a produtividade das culturas, já que as raízes não alcançaram essas camadas mais úmidas (REEVE; SUMNER, 1972).

Tabela 2 - Umidade volumétrica ( $\theta$ ) do solo afetada pela presença ou ausência da exclusão da precipitação nos tratamentos com gesso aplicado isoladamente ou combinado ao calcário.

Profundidade (m)	Exclusão	Tratamentos			
		Testemunha	T1	T2	T3
<b>Cultura da Soja 2014/15</b>					
0,00-0,05	Com	0,16 b	0,16 b	0,17 b	0,19 b
	Sem	0,22 a	0,24 a	0,26 a	0,26 a
	<b>Teste F</b>	<b>361,00**</b>	<b>48,00**</b>	<b>3,37*</b>	<b>30,31*</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>2,13</b>	<b>7,07</b>	<b>9,30</b>	<b>9,20</b>
0,05-0,10	Com	0,24 b	0,26	0,23 b	0,23 b
	Sem	0,30 a	0,34	0,32 a	0,33 a
	<b>Teste F</b>	<b>8,50*</b>	<b>6,45<sup>ns</sup></b>	<b>8,38*</b>	<b>15,00</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>8,76</b>	<b>12,25</b>	<b>13,85</b>	<b>11,29</b>
0,10-0,15	Com	0,25 b	0,29 b	0,22 b	0,25
	Sem	0,32 a	0,46 a	0,31 a	0,34
	<b>Teste F</b>	<b>10,00*</b>	<b>48,28**</b>	<b>6,62*</b>	<b>4,06<sup>ns</sup></b>
	<b>CV (%)</b>	<b>9,01</b>	<b>8,26</b>	<b>15,96</b>	<b>18,46</b>
0,15-0,25	Com	0,29 b	0,31 b	0,27 b	0,30 b
	Sem	0,34 a	0,39 a	0,35 a	0,36 a
	<b>Teste F</b>	<b>15,00*</b>	<b>21,04*</b>	<b>7,62*</b>	<b>7,45*</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>5,02</b>	<b>5,59</b>	<b>15,96</b>	<b>11,86</b>
0,25-0,40	Com	0,30 b	0,31 b	0,29 b	0,29 b
	Sem	0,34 a	0,38 a	0,37 a	0,35 a
	<b>Teste F</b>	<b>49,00*</b>	<b>400,00**</b>	<b>33,80**</b>	<b>20,00*</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>2,53</b>	<b>1,19</b>	<b>5,53</b>	<b>5,71</b>
0,40-0,60	Com	0,27 b	0,33 b	0,30 b	0,29 b
	Sem	0,36 a	0,40 a	0,34 a	0,36 a
	<b>Teste F</b>	<b>25,29**</b>	<b>69,14**</b>	<b>28,12**</b>	<b>36,36**</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>7,25</b>	<b>2,95</b>	<b>3,59</b>	<b>4,10</b>
<b>Cultura do Milho 2015/16</b>					
0,00-0,05	Com	0,18 b	0,19 b	0,19 b	0,21 b
	Sem	0,24 a	0,25 a	0,29 a	0,27 a
	<b>Teste F</b>	<b>18,90*</b>	<b>30,88*</b>	<b>83,73*</b>	<b>46,86**</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>7,72</b>	<b>6,11</b>	<b>5,57</b>	<b>4,93</b>
0,05-0,10	Com	0,19 b	0,29 b	0,26	0,25 b
	Sem	0,25 a	0,39 a	0,34	0,39 a
	<b>Teste F</b>	<b>11,90*</b>	<b>22,75*</b>	<b>20,84<sup>ns</sup></b>	<b>45,45**</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>8,83</b>	<b>7,68</b>	<b>19,85</b>	<b>7,27</b>
0,10-0,15	Com	0,29 b	0,31 b	0,27 b	0,30
	Sem	0,36 a	0,49 a	0,35 a	0,39
	<b>Teste F</b>	<b>22,70**</b>	<b>159,24**</b>	<b>13,30*</b>	<b>7,87<sup>ns</sup></b>
	<b>CV (%)</b>	<b>5,6</b>	<b>4,41</b>	<b>8,71</b>	<b>11,83</b>
0,15-0,25	Com	0,31 b	0,36 b	0,31 b	0,32 b
	Sem	0,36 a	0,41 a	0,37 a	0,39 a
	<b>Teste F</b>	<b>89,50**</b>	<b>34,68*</b>	<b>9,08*</b>	<b>73,46**</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>2,96</b>	<b>5,96</b>	<b>7,91</b>	<b>3,51</b>
0,25-0,40	Com	0,34 b	0,35 b	0,31 b	0,30 b
	Sem	0,37 a	0,42 a	0,40 a	0,38 a
	<b>Teste F</b>	<b>34,70**</b>	<b>31,31**</b>	<b>85,44**</b>	<b>48,10*</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>3,53</b>	<b>4,22</b>	<b>5,56</b>	<b>12,86</b>
0,40-0,60	Com	0,31 b	0,35 b	0,34 b	0,38
	Sem	0,38 a	0,45 a	0,37 a	0,41
	<b>Teste F</b>	<b>46,40*</b>	<b>110,16**</b>	<b>14,86**</b>	<b>3,7<sup>ns</sup></b>
	<b>CV (%)</b>	<b>11,94</b>	<b>3,01</b>	<b>3,93</b>	<b>21,35</b>

Fonte: Dalla Nora (2017); Médias seguidas da mesma letra minúscula, dentro da mesma profundidade e tratamento, entre a presença ou não da exclusão da precipitação não diferiram entre si pelo teste F. ns Não significativo; \* e \*\* significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

A permanência de 30 dias das câmaras sobre a cultura da soja na safra de 2014/15 resultou na exclusão de 184 mm da precipitação normal (Figura 1). Os 30 dias mencionados ocorreram em meio a um período de 60 dias de período crítico, onde 300 mm precipitados resultam na produtividade potencial da cultura (BERGAMASCHI et al., 2007). Para a safra de milho de 2015/1, a exclusão durante o período de 20 dias resultou em uma retirada de 202 mm (Figura 1) de precipitação, sendo esses 20 dias inclusos em um período de 45 dias críticos para o desenvolvimento da cultura, em que, 300 mm de precipitação pluviométrica são necessários para atingir a produtividade potencial da cultura do milho (BERGAMASCHI et al., 2007).

Para a safra da soja, o tratamento testemunha T0 resultou na redução ( $p < 0,05$ ) de 256,0 kg ha<sup>-1</sup> quando houve exclusão da precipitação (Figura 4a), para o tratamento T1 que recebeu calcário a redução foi de 376,0 kg ha<sup>-1</sup>. No entanto, os tratamentos com aporte de gesso (3,0 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>), mesmo com restrição da precipitação, não apresentaram redução significativa da produtividade.

Ainda, sem exclusão da precipitação, os tratamentos T2 e T3 diferiram significativamente ( $p < 0,05$ ) do tratamento T0, porém não diferiram do tratamento T1, e este não diferiu da testemunha (Figura 4a). Com exclusão da precipitação, os tratamentos T2 e T3 foram superiores ( $p < 0,05$ ) aos tratamentos T0 e T1. Nesse contexto, a presença do calcário não foi suficiente para atenuar os efeitos da restrição hídrica.

Considerando o tratamento T0 sem exclusão da precipitação como linha basal (Figura 4b), nota-se redução de 9,3% em relação ao T0 com exclusão. Porém, o tratamento T3 com exclusão da precipitação foi 5,5% superior a linha basal, nesse contexto, a presença da elevada dose de gesso combinada ao calcário, além de suprir a restrição hídrica ainda apresentou acréscimos de produtividade. Considerando os tratamentos T0 e T3 com exclusão hídrica houve diferença de 532,4 kg ha<sup>-1</sup>, dividindo-se esse valor pelo volume precipitado excluído (184 mm) tem-se o valor de 2,89 kg de grãos ha<sup>-1</sup> por mm precipitado excluído que foram supridos pelo tratamento T3 em um período de 30 dias.

Com relação a safra de milho de 2015/16, o tratamento testemunha T0 resultou em redução ( $p < 0,05$ ) de 848 kg ha<sup>-1</sup> quando houve exclusão da precipitação (Figura 4c), para o tratamento T1 que recebeu a reaplicação de calcário a redução ( $p < 0,05$ ) foi de 989 kg ha<sup>-1</sup>. De maneira semelhante a safra da soja no ano anterior (Figura 4a), os tratamentos com aporte de gesso (3,0 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>), mesmo com restrição da precipitação, não apresentaram redução significativa da produtividade.

Ainda, sem exclusão da precipitação, os tratamentos T2 e T3 diferiram significativamente ( $p < 0,05$ ) dos tratamentos T1 e T0, e o tratamento T1 que recebeu apenas



calcário diferiu ( $p < 0,05$ ) da testemunha, com incremento de 5,6% de produtividade em relação a mesma.

Quando a exclusão da precipitação foi submetida, os tratamentos T2 e T3 foram superiores ( $p < 0,05$ ) aos tratamentos T0 e T1 e estes não diferiram entre si. Novamente, a presença da reaplicação do calcário não foi suficiente para atenuar os efeitos da restrição hídrica, sendo efetivo apenas quando a precipitação não foi restringida. Este resultado foi atribuído ao fato da melhoria dos atributos químicos proporcionados pelo calcário estarem restritos as camadas superficiais do solo (Figuras 2 e 3).

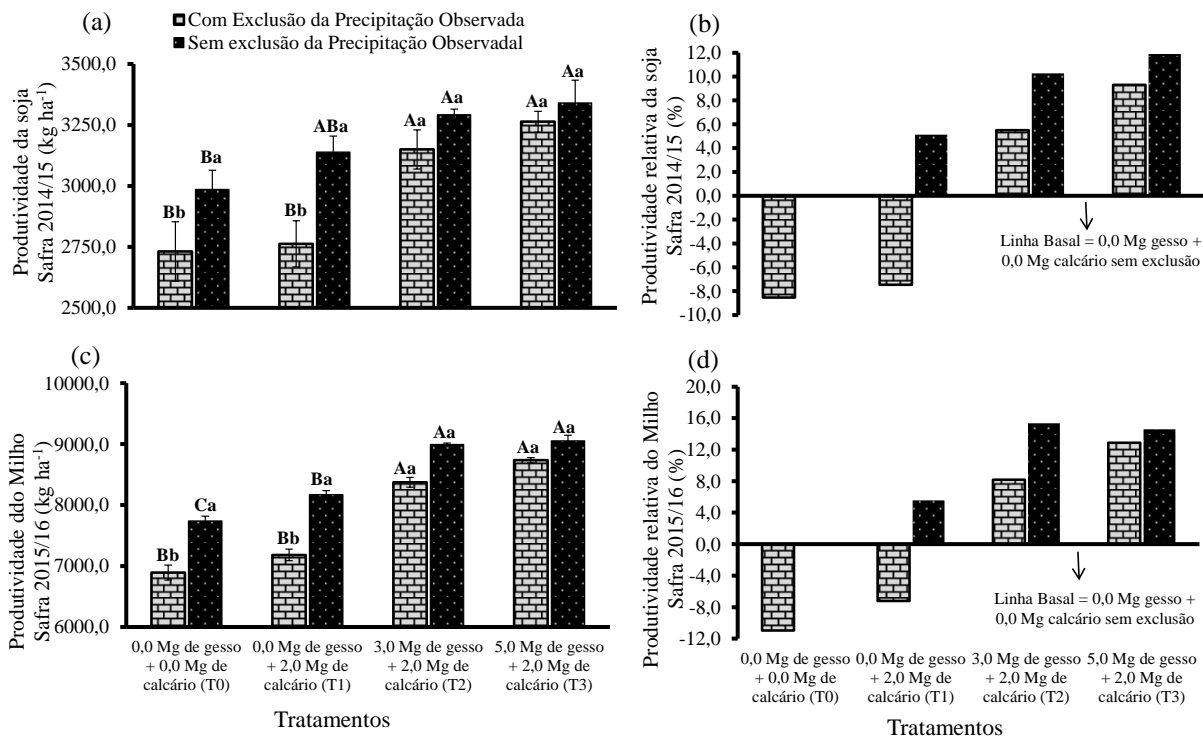
Considerando o tratamento T0 sem exclusão da precipitação como linha basal (Figura 4d), nota-se redução de 12,3% da produtividade do milho em relação ao T0 com exclusão. Porém, o tratamento T3 com exclusão foi 12,9% superior a linha basal. Nesse contexto, a presença da elevada dose de gesso combinada ao calcário (T3), além de suprir a restrição hídrica ainda apresentou acréscimos de produtividade. Considerando os tratamentos T0 e T3 com exclusão hídrica houve diferença de  $1845 \text{ kg ha}^{-1}$ , dividindo-se esse valor pelo volume de precipitação excluída (202 mm) tem-se o valor de  $9,1 \text{ kg de grãos ha}^{-1}$  por mm precipitado excluído que foram supridos pelo tratamento T3 em um período de 20 dias.

Na ausência da exclusão hídrica, o tratamento T3 resultou em um ganho de 29% acumulados em relação a testemunha (T0) somando ambas as safras (12,0% na safra da soja e 17,0% na safra de milho) (Figuras 6b e 6d). Com exclusão hídrica, o ganho acumulado foi ainda superior, totalizando 46% (19,0% na safra da soja e 27,0% na safra de milho). Nota-se, que os ganhos relativos na cultura do milho foram mais expressivos que na cultura da soja. Esse resultado deve-se, em parte, pela maior resposta da cultura do milho ao gesso, associado ao maior volume de água restringido para a cultura do milho.

Resultados reportados por Joris et al. (2013) demonstraram que a redução da toxicidade do  $\text{Al}^{3+}$  pela aplicação de calcário e gesso afetou diretamente a produtividade das culturas, especialmente quando foi constatado estresse hídrico

Os resultados reforçam a importância da melhoria química de uma camada espessa como estratégia de mitigação de restrições hídricas comuns no RS e de incremento da produtividade na ausência desta. Este fato pode representar uma importante estratégia de aprimoramento do sistema plantio direto sob Latossolos distróficos.

Figura 4 - Produtividade da soja na safra 2014/15 afetada pela aplicação de gesso e calcário sobre efeito ou não da exclusão da precipitação (a) e produtividade da soja relativa ao tratamento com 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário sem exclusão da precipitação (b). Produtividade do milho na safra 2015/16 afetada pela aplicação de gesso e calcário sobre efeito ou não da exclusão da precipitação (a) e produtividade do milho relativa ao tratamento com 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso + 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário sem exclusão da precipitação (b). Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas colunas para os tratamentos com gesso e calcário na mesma situação hídrica não diferiram entre si pelo teste F. Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas para o mesmo tratamento com e gesso e calcário na presença ou não da restrição hídrica não diferiram entre si pelo teste F.



Fonte: Dalla Nora (2017)

Para a análise fatorial (AF) entre os atributos relacionados ao crescimento de planta e produtividade foram mantidos todas as variáveis analisadas (Figura 5), inclusive as que apresentaram carga fatorial reduzida (<0,6). Já, na análise fatorial que considerou os atributos químicos do solo e a produtividade foram mantidos apenas os atributos com maior carga fatorial ao longo das camadas do solo (Figura 6), uma vez que o melhor ajuste ocorreu sem as demais variáveis.

Os modelos que melhor se ajustaram aos dados de atributos de crescimento de planta e produtividade foram compostos por dois fatores (foram considerados os fatores com autovalor superior a 1,0 e que a soma da porcentagem de variância explicada superasse 70%), explicando, cerca de, 91% da variância total das variáveis originais na safra da soja (2014/15) sem exclusão

da precipitação (Figura 5a). Quando a exclusão da precipitação foi submetida para a mesma safra, 90% da variância total das variáveis foi explicada (Figura 5b).

Para a safra de milho de 2015/16, foi explicado cerca de 85 e 92% na ausência (Figura 5c) e presença (Figura 5d) de exclusão da precipitação, respectivamente, considerando a produtividade e atributos relacionados ao crescimento de plantas.

A solução fatorial extrai os fatores na ordem de sua importância, assim, para a safra da soja sem exclusão, o primeiro fator explicou 59,1% da variabilidade dos dados (Figura 5a). As variáveis com maior carga fatorial e associação nesse fator foram a produtividade, grãos por legume, NDVI, IAF e teor de  $\text{Ca}^{2+}$  foliar. Para a soja, com exclusão da precipitação (Figura 5b), o primeiro fator explicou 51,7% da variância das variáveis. Nesse caso, as variáveis com maior carga fatorial e associação foram a produtividade, NDVI, IAF,  $\text{Ca}^{2+}$  e N foliar.

Para a cultura do milho sem exclusão da precipitação (Figura 5c), o primeiro fator explicou 56,6% da variância das variáveis. Nesse caso, as variáveis com maior carga fatorial e associação foram a produtividade, número de fileiras e peso de 1000 grãos, NDVI, IAF e  $\text{Ca}^{2+}$  foliar. Já, para a ocorrência da exclusão da precipitação o primeiro componente explicou 56,1% da variância e as variáveis mais associadas foram as mesmas da ausência da exclusão, incluindo-se o teor de N foliar (Figura 5d).

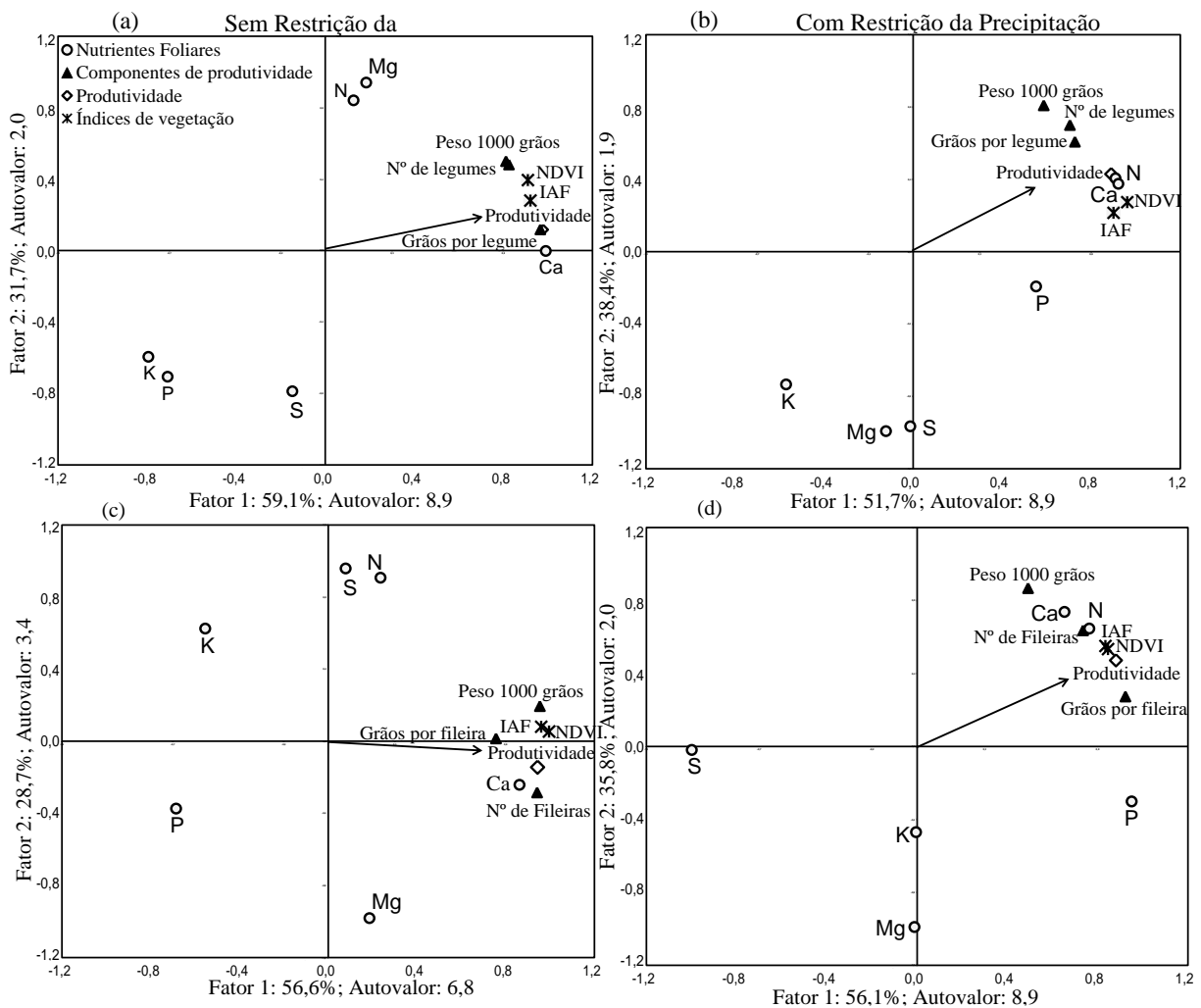
Grande parte do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) provenientes de fertilizantes amoniacais é convertido em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), o qual movimenta-se para o subsolo (CAIRES, 2013). Para culturas sensíveis a acidez, o limitado crescimento radicular impede a absorção do  $\text{NO}_3^-$  nessas camadas, assim em solos ácidos onde o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  é reduzido o crescimento radicular é severamente afetado. Na planta o cálcio é constituinte da parede celular e tem importante papel na absorção iônica (VITTI et al., 2006). Segundo estes autores a falta de  $\text{Ca}^{2+}$  afeta os pontos de crescimento da raiz. Venturin et al. (1999) citam que a ausência de  $\text{Ca}^{2+}$  na adubação afetou a absorção de demais nutrientes.

Ainda, para o processo de nodulação nas leguminosas, há maior necessidade de  $\text{Ca}^{2+}$  do que para o crescimento da planta propriamente dito, pois, uma vez formado os nódulos, a planta pode crescer em condições relativamente baixas desse nutriente (VITTI et al; 2006). Rosolem et al. (2003) citam que a calagem aumenta a disponibilidade de nitrogênio às plantas, pois favorece a mineralização e a nitrificação.

De maneira geral, a presença de  $\text{Ca}^{2+}$  foi importante ao longo do desenvolvimento das plantas, especialmente quando a exclusão da precipitação foi imposta. Esse resultado sugere que a presença de elevados teores de  $\text{Ca}^{2+}$  promovem a formação de um ambiente mais

favorável para o desenvolvimento radicular, aumentando a resistência das culturas a condições de déficit hídrico.

Figura 5 - Gráfico Biplot dos fatores principais da análise fatorial após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser dos atributos relacionados ao crescimento e produtividade da cultura da soja sem (a) e com (b) restrição da precipitação e da cultura do milho sem (c) e com (d) restrição da precipitação.



Fonte: Dalla Nora (2017)

A comunalidade, indicativo do quanto da variância de cada atributo é explicada pelos fatores conjuntamente, auxiliou na seleção das variáveis que mais contribuíram no modelo (Tabela 3). Para a soja, com exclusão da precipitação, as variáveis NDVI, grãos por legumes teor de  $\text{Ca}^{2+}$  foliar foram mais explicadas pelo modelo. Já, na presença da exclusão, o componente de produtividade peso de 1000 grãos e o teor de N foliar também foram mais evidenciados. Na cultura do milho, sem presença de exclusão da precipitação as variáveis IAF, número de fileiras e peso de 1000 grãos foram mais explicadas. Já, na presença de exclusão, as

variáveis IAF, NDVI, peso de 1000 grãos e os nutrientes foliares  $\text{Ca}^{2+}$  e N foram melhor determinados pelo modelo.

Tabela 3 - Comunalidades após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser para os resultados de produtividade e atributos de planta nas safras de 2014/15 e 2015/16 na ausência ou presença de restrição da precipitação.

Comunalidades					
Variáveis	Soja 2014/15		Variáveis	Milho 2015/16	
	Sem Exclusão	Com Exclusão		Sem Exclusão	Com Exclusão
IAF	0,93	0,86	IAF	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>
NDVI	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	NDVI	0,92	<b>0,99</b>
Produtividade	0,94	0,97	Produtividade	0,91	0,98
Nº de legumes	0,91	<b>0,99</b>	Nº de Fileiras	<b>0,96</b>	0,94
Grãos por legume	<b>0,97</b>	0,89	Grãos por fileira	0,57	0,92
Peso 1000 grãos	0,91	<b>0,99</b>	Peso 1000 grãos	<b>0,94</b>	<b>0,99</b>
P	0,96	0,34	P	0,61	0,93
K	0,95	0,86	K	0,69	0,22
Ca	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	Ca	0,80	<b>0,97</b>
Mg	0,92	0,93	Mg	0,91	0,96
S	0,64	0,93	S	0,92	0,96
N	0,72	<b>0,99</b>	N	0,87	<b>0,99</b>

Fonte: Dalla Nora (2017)

Os modelos que melhor se ajustaram aos dados relacionados aos atributos químicos do solo e produtividade foram compostos por dois fatores, explicando, cerca de, 96% da variância total das variáveis originais na safra da soja (2014/15) sem exclusão da precipitação (Figura 6a). Já, quando a exclusão da precipitação foi imposta, 95% da variância total foi explicada pelo modelo (Figura 6b).

Para a safra de milho de 2015/16 foi explicado cerca de 95% e 93% da variância total das variáveis na ausência (Figura 6c) e na presença (Figura 5d) de exclusão da precipitação, respectivamente.

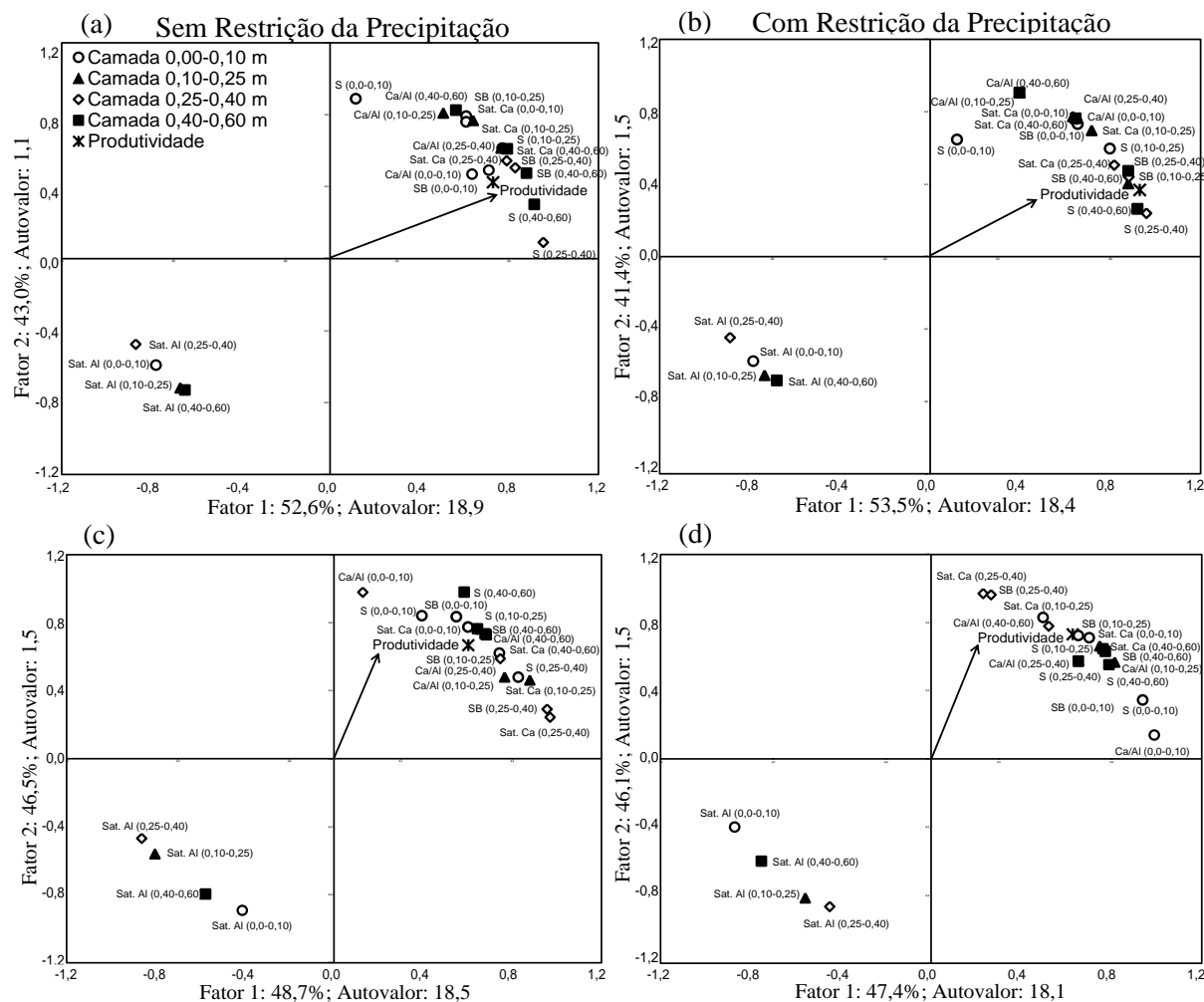
Para a soja sem exclusão, as variáveis com maior carga fatorial positiva e associação foram SB e saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  em camadas superficiais (0,00-0,10 m), já a maiores cargas negativas estiveram relacionadas a saturação por  $\text{Al}^{3+}$  (camada de 0,00-0,10 m) (Figura 6a). Para a soja com exclusão (Figura 6b), as cargas fatoriais mais positivas e mais negativas se deram em camadas mais profundas do solo (0,10-0,25 m).

Para a cultura do milho (safra 2015/16) sem exclusão da precipitação (Figura 6c), as variáveis com maior carga fatorial positiva foram a SB e saturação por  $\text{Ca}^{2+}$ . Já, a saturação por  $\text{Al}^{3+}$  apresentou maior carga fatorial negativa. De maneira semelhante, os mesmos atributos apresentaram as maiores cargas fatoriais na presença de exclusão da precipitação na cultura do milho, contudo em camadas mais profundas do solo (Figura 6d). Rampim et al. (2011)

constatarem que as culturas responderam à melhoria química do solo pela aplicação de gesso quando houve restrição hídrica. Esse efeito foi constatado devido às condições mais adequadas do sistema radicular, favorecendo, assim, 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 diminuição do  $Al^{3+}$  reduziu a toxicidade deste sobre as culturas mesmo quando não foi constatado estresse hídrico.

O aumento na saturação por bases e a redução na saturação por  $Al^{3+}$ , decorrente da movimentação dos cátions  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  (RAIJ, 2010), sugere que a melhoria química do subsolo foi eficiente e fundamental para proporcionar um ambiente adequado para desenvolvimento radicular e melhor aproveitamento de água e nutrientes (RITCHEY et al., 1980). Resultados observados por Souza et al. (2012) corroboram aos encontrados nesse estudo, em que os autores verificaram aumentos significativos na SB pelo uso do gesso e calcário em camadas profundas após 56 meses da aplicação dos tratamentos, aumentando a produtividade das culturas de grãos.

Figura 6 - Gráfico Biplot dos fatores principais da análise fatorial após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser dos atributos químicos do solo e produtividade da cultura da soja sem (a) e com (b) restrição da precipitação e da cultura do milho sem (c) e com (d) restrição da precipitação.



Fonte: Dalla Nora (2017)

Para a soja, com exclusão da precipitação, as variáveis SB, saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  e a relação Ca/Al na camada de 0,00-10 m foram mais explicadas pelo modelo com dois fatores (Tabela 4). Já, na presença da exclusão da precipitação, as variáveis anteriormente citadas, juntamente a SB e saturação por  $\text{Al}^{3+}$  na camada de 0,10-0,25 m apresentaram maior carga fatorial. Na cultura do milho, sem presença de exclusão da precipitação, as variáveis SB e saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  na camada de 0,00-0,10 m foram mais explicadas. Já, na presença de exclusão, as variáveis SB e saturação por  $\text{Al}^{3+}$  na camada de 0,10-0,25 m foram melhor determinados pela solução fatorial.

Tabela 4 - Comunalidades após rotação ortogonal pelo Método Varimax com normalização de Kaiser para os resultados de produtividade e atributos de solo nas safras de 2014/15 e 2015/16 na ausência ou presença de restrição da precipitação.

Variáveis	Comunalidades			
	Soja 2014/15		Milho 2015/16	
	Sem Exclusão	Com Exclusão	Sem Exclusão	Com Exclusão
Produtividade	0,86	0,99	0,81	0,92
S (0,0-0,10)	0,80	0,43	0,86	0,95
Sat. Al (0,0-0,10)	0,95	0,94	0,96	0,91
SB (0,0-0,10)	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	0,98
Ca/Al (0,0-0,10)	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	0,97	0,92
Sat. Ca (0,0-0,10)	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>
S (0,10-0,25)	0,97	0,96	0,99	0,94
Sat. Al (0,10-0,25)	0,96	<b>0,99</b>	0,96	<b>0,99</b>
SB (0,10-0,25)	0,97	<b>0,99</b>	0,93	<b>0,99</b>
Ca/Al (0,10-0,25)	0,91	0,97	0,81	0,75
Sat. Ca (0,10-0,25)	0,95	0,96	0,91	0,93
S (0,25-0,40)	0,95	0,97	0,90	0,87
Sat. Al (0,25-0,40)	0,98	<b>0,99</b>	0,96	0,95
SB (0,25-0,40)	0,94	0,97	0,97	<b>0,99</b>
Ca/Al (0,25-0,40)	0,96	0,98	0,97	0,75
Sat. Ca (0,25-0,40)	0,92	0,92	0,97	0,95
S (0,40-0,60)	0,92	0,91	0,95	0,92
Sat. Al (0,40-0,60)	0,95	0,93	0,96	0,92
SB (0,40-0,60)	0,97	0,99	0,97	0,97
Ca/Al (0,40-0,60)	0,97	0,98	0,97	0,75
Sat. Ca (0,40-0,60)	0,97	0,97	0,97	0,96

Fonte: Dalla Nora (2017)

De acordo com os resultados obtidos pela análise fatorial (Figura 4 e Tabela 3) foram selecionadas as variáveis relacionadas ao crescimento da planta que apresentaram as maiores cargas fatoriais e maiores porcentagens de comunalidade, com estas variáveis foram ajustadas curvas de regressão com a produtividade (Figuras 7 e 8).

Para a maioria dos atributos, foram encontrados valores mais elevados quando da presença da maior dose de gesso combinada com calcário (T3). Com relação aos índices NDVI e IAF para a cultura da soja, ambos apresentaram ajuste linear positivo e significativo com a produtividade na ausência (Figura 7a) ou presença (Figura 7b) de exclusão da precipitação. Esse efeito ( $p < 0,01$ ) foi mais evidente quando realizada a exclusão da precipitação (Figura 7b), sendo que o NDVI aumento de 0,80 (T0) para 0,83 (T3) resultando em aumento da produtividade ajustada de 2942,0 para 3190,0, respectivamente. De maneira semelhante, o IAF aumentou de 4,53 para 5,05, seguindo o aumento da produtividade da soja.

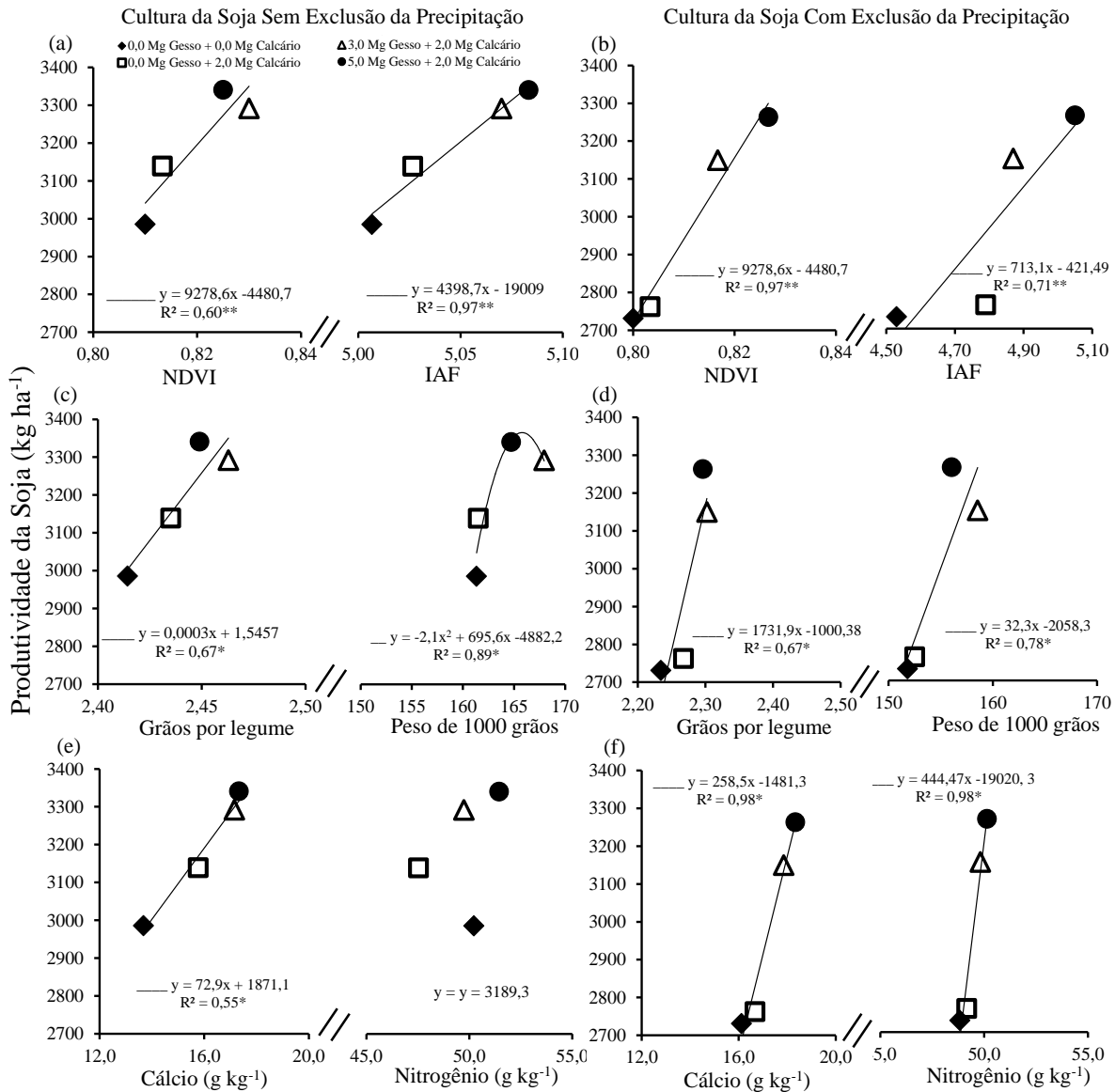
De maneira semelhante, ajustes positivos e significativos foram obtidos entre grãos por legume e peso de 1000 grãos com a produtividade, especialmente quando houve exclusão da precipitação (Figura 7d). Em especial, o componente de produtividade grãos por legume aumentou de 2,2 (T0) para 2,4 (T2).



Como relação os teores de nutrientes foliares, com a ausência da exclusão da precipitação (Figura 7e), apenas o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  apresentou relação ( $p < 0,05$ ) com a produtividade da soja. Já, quando a exclusão da precipitação foi imposta, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e N apresentaram relação positiva ( $p < 0,05$ ) com a produtividade. O teor de  $\text{Ca}^{2+}$  aumentou de 16,1 (T0) para 18,3 (T3), resultando em aumento de 2706,0  $\text{kg ha}^{-1}$  para 3249  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente. Destaca-se, que o tratamento T3 recebeu 5,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de gesso combinado a 2,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de calcário.

Esses resultados reforçam a importância do  $\text{Ca}^{2+}$  na nutrição da planta, melhorando os parâmetros de crescimento (IAF e NDVI), além de afetar positivamente a absorção de outros nutrientes fundamentais como o N (VITTI et al; 2006; ROSOLEM et al. 2003). Ainda, além da melhoria da nutrição das plantas houve o aproveitamento mais eficiente da água presente em camadas mais profundas do perfil.

Figura 7 - Relação entre produtividade da soja e o NDVI e IAF na ausência (a) ou presença (b) da exclusão da precipitação. Relação entre produtividade da soja e os grãos por legume e peso de 1000 grãos na ausência (c) ou presença (d) da exclusão da precipitação. Relação entre produtividade da soja e o teor de cálcio e nitrogênio foliar na ausência (e) ou presença (f) da exclusão da precipitação. ns Não significativo; \* e \*\* significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.



Fonte: Dalla Nora (2017)

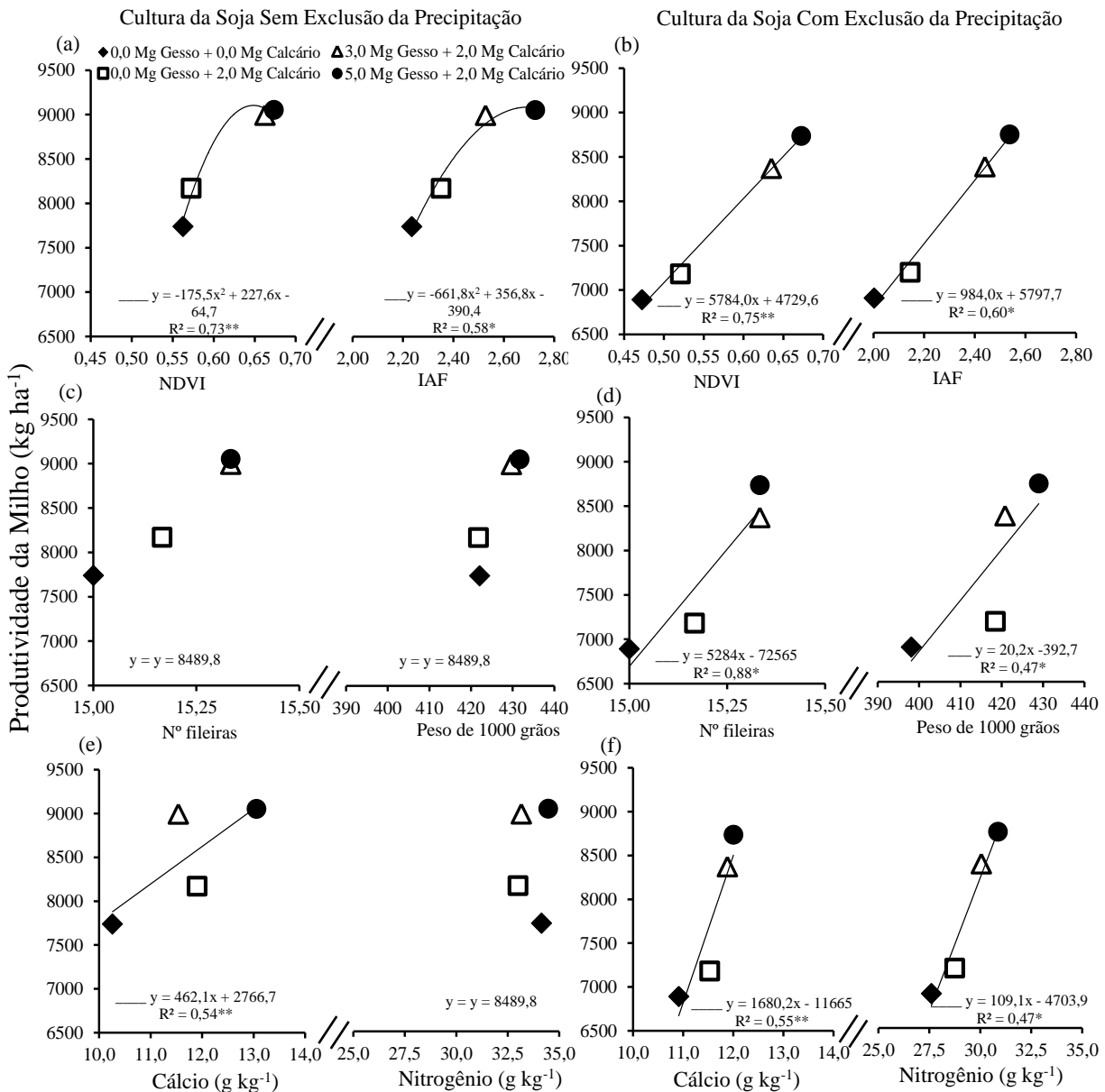
Com relação à cultura do milho na safra de 2015/16 foram obtidos resultados semelhantes aos encontrados para a cultura da soja para a maioria dos atributos (Figura 8). De maneira geral, foram encontrados valores mais elevados de produtividade e dos atributos de crescimento de plantas para o tratamento que recebeu a maior dose de gesso combinada com calcário (T3).

Para aos índices NDVI e IAF, foram observados ajustes quadráticos ( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , respectivamente) com a produtividade na ausência da exclusão hídrica (Figura 8a). Já, quando a exclusão hídrica foi imposta, para ambos os índices foi verificado ajuste linear positivo e significativo com a produtividade (Figura 8b). O NDVI aumentou de 0,47 (T0) para 0,67 (T3) resultando em aumento da produtividade ajustada de 7448,0 para 8605,0 kg ha<sup>-1</sup> de milho, respectivamente. Semelhantemente, o IAF aumentou de 2,00 para 2,53 para os respectivos tratamentos citados anteriormente.

Para os componentes de produtividade, não foi verificada relação significativa na ausência da exclusão (Figura 8c). Já, na presença da exclusão o número de fileiras e peso de 1000 grãos foram afetadas significativamente (Figura 8d), com maior destaque ao peso de 1000 grãos que aumentou de 398,1 (T0) para 429,0 (T3) resultando na variação de 7649,0 para 8271,0 kg ha<sup>-1</sup> de produtividade de grãos de milho, respectivamente.

Com relação aos teores de nutrientes foliares, com a ausência da exclusão da precipitação (Figura 8e), apenas o teor de Ca<sup>2+</sup> apresentou relação ( $p < 0,01$ ) com a produtividade. Já, para a ocorrência da exclusão, os teores de Ca<sup>2+</sup> e N apresentaram relação positiva ( $p < 0,05$ ) com a produtividade (Figura 8f). O teor de Ca<sup>2+</sup> aumentou de 10,9 (T0) para 12,0 g kg<sup>-1</sup> (T3), resultando em aumento de 6649,0 kg ha<sup>-1</sup> para 8497,0 kg ha<sup>-1</sup> de grãos de milho, respectivamente. O teor de N foliar variou de 27,6 (T0) a 30,1 g kg<sup>-1</sup> (T3). Os resultados reforçam a importância do Ca<sup>2+</sup> para a nutrição das plantas, melhorando os índices de crescimento e a absorção de N.

Figura 8 - Relação entre produtividade do milho e o NDVI e IAF na ausência (a) ou presença (b) da exclusão da precipitação. Relação entre produtividade do milho e número de fileiras e peso de 1000 grãos na ausência (c) ou presença (d) da exclusão da precipitação. Relação entre produtividade do milho e o teor de cálcio e nitrogênio foliar na ausência (e) ou presença (f) da exclusão da precipitação. ns Não significativo; \* e \*\* significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.



Fonte: Dalla Nora (2017)

De maneira semelhante ao realizado com as variáveis relacionadas ao crescimento das plantas, os atributos químicos do solo que mais se destacaram na análise fatorial (Figura 5 e Tabela 4) foram selecionados e relacionados com a produtividade (Figura 9). Para a cultura da soja sem exclusão da precipitação (Figura 9a), os atributos SB e saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  na camada de 0,00-0,10 m apresentaram ajuste quadrático ( $p < 0,05$ ) com a produtividade. Nesse caso a

produtividade máxima (3397,0 kg ha<sup>-1</sup>) foi atingida com SB de 56,3%. Já, a saturação por Ca<sup>2+</sup> máxima de 40,0% atingiu a produtividade ajustada de 3459,0 kg ha<sup>-1</sup>.

Quando a exclusão da precipitação foi imposta, os índices relacionados com a produtividade foram a SB e a saturação por Al<sup>3+</sup>, porém, na camada de 0,10-0,25 m (Figura 9b). A SB máxima de 33,0% e saturação por Al<sup>3+</sup> mínima de 24,0% resultaram nas produtividades de milho ajustadas de 3337,0 kg ha<sup>-1</sup> e 3279,0 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Nota-se que os valores dos índices que resultaram nas máximas produtividades são muito próximos do tratamento T3 que recebeu a maior dose de gesso combinada ao calcário.

Para a cultura do milho, os índices SB e saturação por Ca<sup>2+</sup> na camada de 0,00-0,10 m apresentaram ajustes lineares e positivos com a produtividade ( $p < 0,05$ ) na ausência da exclusão da precipitação (Figura 9c). Os respectivos índices foram de 62,8 % e 45,0 % atingindo a produtividade média ajustada de 9230,0 kg ha<sup>-1</sup> para o tratamento T3.

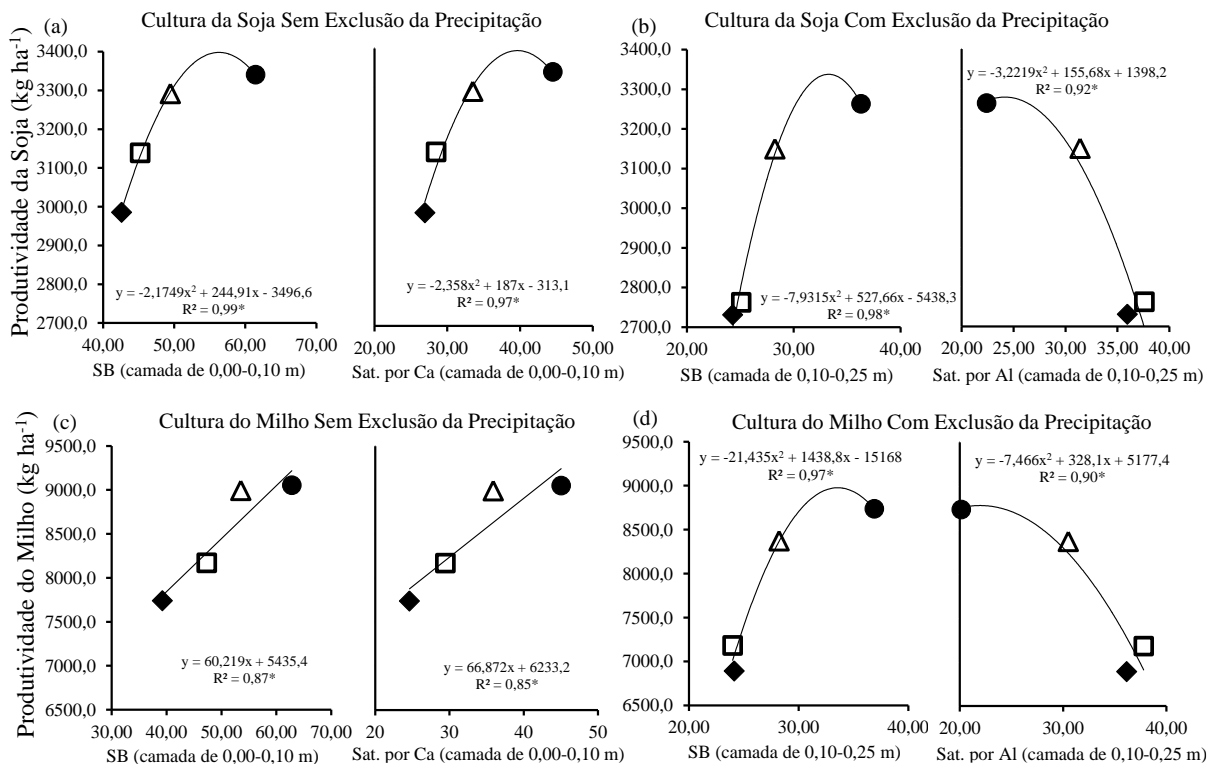
Quando imposta a restrição hídrica para a cultura do milho foram observadas relações quadráticas ( $p < 0,05$ ) entre a SB e saturação por Al<sup>3+</sup> com a produtividade, porém a camada de solo relacionada foi mais profunda, de 0,10-0,25 m (Figura 9d). Para os respectivos índices foram encontrados valores de 34,0% e 22,0%, atingindo a produtividade média de 8877,0 kg ha<sup>-1</sup>. Para poáceas que apresentam CTC radicular mais baixa (FERNANDES; SOUZA, 2006), a absorção de Ca<sup>2+</sup> pode ser favorecida pelo aumento de Ca<sup>2+</sup> (CAIRES et al., 2004).

De maneira semelhante para a soja e para o milho, as camadas diagnósticas na ocorrência de deficiência hídrica são mais profundas que as camadas superficiais tradicionalmente utilizadas (0,00-0,10 m). Nesse caso, pressupõe-se que as camadas mais profundas e com maior teor de umidade (Tabela 2) foram fundamentais para a manutenção da atividade fisiológica das plantas. Contudo, o uso da água em camadas mais profundas, apenas será possível quando a subsuperfície apresentar condições químicas propícias para o crescimento radicular (DALLA NORA et al., 2014). Nesse contexto, estratégias que melhorem quimicamente as camadas subsuperficiais do solo são fundamentais para atenuar os efeitos deletérios dos déficits hídricos de curta duração recorrentes no Estado do RS.

Os resultados observados estão de acordo com 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. 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.

Em estudos anteriores, Dalla Nora e Amado (2013) propuseram que as máximas produtividades das culturas de milho e soja foram encontradas quando a saturação por  $Al^{3+}$  foi reduzida abaixo de 10% e a SB aumentada para valores superiores a 50% na camada de 0,25-0,40 m em dois Latossolos do RS. Caires et al. (2000) em um Latossolo do Paraná, observaram máximo retorno econômico em cinco anos para as culturas da soja, milho e trigo quando a saturação por bases foi calculada para alcançar 65% na camada de 0,00-0,20 m.

Figura 9 - Relação entre saturação por bases e saturação por Ca com a produtividade da soja sem exclusão da precipitação (a) e relação entre saturação por bases e saturação por Al com a produtividade da soja com exclusão da precipitação (b). Relação entre saturação por bases e saturação por Ca com a produtividade do milho sem exclusão da precipitação (c) e relação entre saturação por bases e saturação por Al com a produtividade do milho com exclusão da precipitação (d). \* significativo a 5% pelo teste F.



Fonte: Dalla Nora (2017)

## 8.5. Conclusões

A adição de gesso combinada ao calcário proporcionou incremento na SB e redução na saturação por  $Al^{3+}$  nas camadas subsuperficiais, já a aplicação ou reaplicação de calcário apenas afetou a camada superficial do solo (0,00-0,10 m).

Os tratamentos com gesso combinado ao calcário proporcionaram aumento da produtividade das culturas com ou sem exclusão da precipitação, porém, na presença da

exclusão o efeito dos insumos foi mais evidente, incrementando 46% da produtividade acumulada de ambas as safras.

Ainda, o gesso combinado ao calcário supriu a presença de exclusão hídrica. Os parâmetros de crescimento de plantas foram severamente afetados com a presença da exclusão hídrica.

Com a exclusão da precipitação houve relações ( $p < 0,05$ ) entre o aumento da produtividade e a melhoria dos atributos químicos em camadas mais profundas do solo (0,10-0,25 m).

A melhoria química de uma camada espessa foi uma estratégia eficiente para mitigação do efeito de déficit hídrico sobre a produtividade das culturas de grãos.

## 8.6. Referências Bibliográficas

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

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.

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

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.

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

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. 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. 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., 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, 2011.

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.

CHEN, L.; DICK, W. A. Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines. **The Ohio State University Extension, Columbus**. 2011. <http://ohioline.osu.edu/b945/index.html> (accessed 4 Jan. 2013).

CHEN, L.; KOST, D.; DICK, W. A. Flue gas desulfurization products as sulfur sources for corn. **Soil Science Society of American Journal**, v. 72, p. 1464–1470, 2008.

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, 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.

CRONAN, C. S.; GRIGAL, D. F. Use of calcium/aluminium ratios as indicators of stress in forest ecosystems. **Journal of Environmental Quality**, v. 24, p. 209-226, 1995.

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.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implantação do sistema plantio direto. **A Lavoura**, Rio de Janeiro, p. 112:20-22, 2009.

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**, v. 1, p. 19-29, 2014.

EL-SHIKHA, D. M. et al. Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. **Agriculture Water Management**, Madson, v. 92, p. 183-193, 2007.

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**. 2 ed. Embrapa- CNPS, Rio de Janeiro, 2006. 396 p.



FARINA, M. P. W. Management of subsoil acidity in environments outside the humid tropics. p. 179–190. In A.C. Moniz 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. Longterm growth effects. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 64, p. 646–651, 2000

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.

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.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1938. 388p.

HATFIELD, J. L. Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review. **Agronomy Journal**, Madson, v. 93, p. 271–280, 2001.

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.

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.

LIU, J.; HUE, N. V. Amending subsoil acidity by surface applications of gypsum, lime and composts. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, Madson, v. 32, p. 2117- 2132, 2001.

LSPA- Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (Pesquisa Mensal de Previsão e Acompanhamento das Safras Agrícolas no Ano Civil)- IBGE- **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2008.

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

MASUD, M.M.; LI, J.Y.; XU, R.K. Application of alkaline slag and phosphogypsum for alleviating soil acidity in an Ultisol profile: a shortterm leaching experiment. **Journal Soil Sediment**, v. 15, p. 365-373, 2015.

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.

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

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B.VAN. **Correção da acidez do solo**. In: RAIJ, B. V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas. 1996. p.14-19. (Boletim Técnico, 100).

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

RAIJ, B.va, et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico/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. **Agrochimophysics**, 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.; FOLONI, J. S. S.; OLIVEIRA, R. H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 301-309, 2003.

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

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

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

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.

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

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**. 4ª.ed. Porto Alegre: Artmed; 2009.

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

VENTURIN, N. et al. Adubação mineral de angicoamarelo (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 3, p. 441-448, mar. 1999.

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.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. **Cálcio, magnésio e enxofre**. In: FERNANDES, M. S. (ed.). *Nutrição Mineral de Plantas*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-326.

XUE, L. H. et al. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. **Agronomy Journal**, Madson, v. 96, p. 135-142, 2004.

WATTS, D. B.; DICK, W. A. Sustainable Uses of FGD Gypsum in Agricultural Systems: Introduction. **Journal Environmental Quality**, v. 43, p. 246-252, 2014.

WATTS, D. B.; TORBERT, H. A. 2009. Impact of gypsum applied to grass buffer strips on reducing soluble P in surface water runoff. **Journal Environmental Quality**, v. 38, p. 1511-1517, 2009.

WINGEYER, A. B. et al. Soil quality impacts of current South American agricultural practices. **Sustainability**, v. 7, p. 2213-2224, 2015



## 9. ARTIGO V – PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO E MECANISMOS DE DESCIDA DO CÁLCIO COM APLICAÇÃO DE GESSO

### 9.1. Resumo

O aumento da produtividade das culturas de grãos pela aplicação do gesso em Latossolos distróficos tem sido relacionado ao incremento de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ). Contudo, a dinâmica da descida desse elemento no perfil do solo, bem como as doses ideais de gesso para o Estado do Rio Grande do Sul (RS) não estão bem definidas. Nesse contexto, o presente estudo buscou compreender a dinâmica de melhoria das camadas subsuperficiais pelo incremento do teor de  $\text{Ca}^{+2}$  e a relação do gesso com o aumento da produtividade das culturas. Foram conduzidos cinco experimentos em Latossolos distróficos do RS com delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições. Os experimentos 1 e 2 foram implantados em 2009 com doses de gesso variando de 0,0 a 6,5  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Os experimentos 3 e 4 foram implantados em 2011 com doses de gesso variando de 0,0 a 5,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  no experimento 3 e 0,0 a 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  no experimento 4. O experimento 5 foi implantado no ano de 2013 com doses de gesso variando de 0,0 a 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$ . As amostragens de solo foram feitas temporalmente e de forma estratificada na camada de 0,00-0,60 m. Foram avaliadas as culturas de soja, trigo e milho, além dos teores de Ca e N foliar. O incremento do teor de enxofre ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) apresentou relação significativa com o aumento dos teores de  $\text{Ca}^{+2}$  nas camadas mais profundas. O aumento dos teores de  $\text{Ca}^{+2}$  em cada camada do solo apresentou relação significativa com a camada imediatamente inferior, com excessão das camadas mais profundas do solo. Considerando um tempo de retorno econômico de cinco a seis anos, a dose de gesso que maximiza a produtividade das culturas de soja, milho e trigo é de 4,4  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Os teores de Ca e N foliar foram incrementados na mesma proporção do aumento da produtividade das culturas a partir da aplicação do gesso.

**Palavras-chave:** Saturação por bases. Subsuperfície. Enxofre.

### 9.2. Introdução

A partir da adoção do sistema plantio direto (SPD) diversas vantagens em relação a outros sistemas de preparo têm sido observadas, destacando-se a rapidez na implantação das

culturas, economia na mão de obra e de consumo de combustível, incremento do teor de matéria orgânica do solo (MOS) e controle da erosão (BOLLINGER et al., 2007; BLANCO-CANQUI; LAL, 2008; MOUSSA-MACHRAOUI, et al., 2010). Em função disto, o SPD experimentou uma rápida adoção voluntária no Brasil, alcançando aproximadamente 30 milhões de ha com culturas de grãos (DERPSCH; FRIEDRICH, 2009).

No entanto, a não adoção de rotação de culturas e de culturas de cobertura sob SPD tem ocasionado insuficiente cobertura do solo e a ocorrência de impedimento físico e químico ao aprofundamento do sistema radicular das culturas (DENARDIN et al., 2008; WINGEYER et al., 2015). A dificuldade de melhoria química de camadas subsuperficiais sob SPD está associada à lenta movimentação vertical de corretivos na ausência de incorporação mecânica (BORTOLUZZI et al., 2014). Notadamente, sob Latossolos ácidos a aplicação superficial de corretivos, em doses reduzidas e espaçadas em intervalos longos de tempo, geralmente resulta na formação de um perfil com acentuado gradiente vertical de qualidade química entre a superfície e o subsolo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008; CAIRES, 2013; BORTOLUZZI et al., 2014; DALLA NORA et al., 2014).

O aporte de calcário e gesso afeta a relação entre cátions na solução do solo e a fase sólida do solo, favorecendo o seu incremento na solução, enquanto que o aporte de ânions, com elevada mobilidade na solução do solo, favorece o movimento vertical de cations através do solo (CICHOTA et al. 2007; ALVES; OKUMA, 2011). Assim, enquanto o calcário eleva os teores de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) na camada superficial, o gesso por ser mais solúvel e aportar concomitantemente o  $\text{Ca}^{+2}$  e o sulfato ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) atua nas camadas subsuperficiais (RAIJ, 2010; WATTS; DICK, 2014). Assim, a rápida movimentação do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  no perfil do solo sob condições de precipitação elevada, promove o deslocamento de cátions como o  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e, em menor quantidade, potássio ( $\text{K}^+$ ) (RAIJ, 2010). O incremento do teor de  $\text{Ca}^{+2}$  em subsuperfície favorece o deslocamento do alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ) do complexo de troca para a solução do solo, aonde ocorre a formação do complexo  $\text{AlSO}_4^+$  que é deslocado para camadas mais profundas com a água de drenagem.

Geralmente, na camada superficial do SPD verificam-se as seguintes características: (i) menor fitotoxicidade de  $\text{Al}^{+3}$  devido a complexação com a MOS (BROWN et al., 2008; ALLEONI et al., 2010); (ii) concentrações elevadas de cátions trocáveis (CAIRES et al., 2006); (iii) umidade do solo mais elevada pela manutenção da cobertura morta (MOUSSA-MACHRAOUI et al., 2010). Estas características favorecem a concentração do sistema radicular nesta camada e diminuem o efeito negativo do  $\text{Al}^{+3}$  sobre as plantas. Porém, a acidez de camadas subsuperficiais dos Oxisols representa um impedimento químico ao

aprofundamento do sistema radicular das culturas de grãos (SHAINBERG et al., 1989; FARINA et al., 2000).

Nos Estados Unidos, os benefícios do gesso como fonte de nutrientes para as plantas e como condicionador de solo agrícola são reconhecidos desde os tempos coloniais, que remontam ao final do século XVIII (CROCKER, 1922). Dentre os efeitos positivos do gesso, destacam-se o suprimento de  $S-SO_4^{2-}$ , macronutriente secundário fundamental para o funcionamento da enzima nitrogenase na cultura da soja, essencial para a fixação biológica de nitrogênio (N) (NUNES et al., 2003). O  $Ca^{+2}$ , outro nutriente aportado pelo gesso, é requerido na extremidade das raízes (TAIZ; ZEIGER, 2009), especialmente em condições de pH baixo como geralmente observado no subsolo de Latossolos distróficos (TOMA et al., 1999).

A barreira química ao aprofundamento do sistema radicular compromete a eficiência no uso da água armazenada no solo intensificando o impacto de estresse hídrico de curta duração sob a produtividade das culturas (JORIS et al., 2013; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Recentes estudos conduzidos no Brasil por Caires et al. (2005; 2011), Souza et al. (2012), Caires (2013), Dalla Nora e Amado (2013), Blum et al (2014) e Pauletti et al (2014), e também nos Estados Unidos (USA) (WATTS; TORBERT 2009; CHEN; DICK, 2011; WATTS; DICK, 2014) reportaram que o uso de gesso promoveu o incremento na produtividade das culturas de grãos, especialmente em condições de déficit hídrico. Nesse contexto, o presente estudo buscou compreender a dinâmica de melhoria das camadas subsuperficiais pelo incremento do teor de Ca e a relação do gesso com o aumento da produtividade das culturas.

### **9.3. Material e Métodos**

### **9.4. Descrição das áreas de estudo**

Foram conduzidos cinco experimentos em quatro municípios do RS. Todas as áreas investigadas estão localizadas sobre Latossolos Vermelhos distróficos com teores de argila variando de 40 a 70% na camada de 0,20-0,40 m (EMBRAPA, 2006). Segundo Köppen (1931) o clima das regiões é classificado como subtropical úmido (Cfa). As coordenadas, altitude e precipitação normal anual de cada experimento estão representadas na Tabela 1.

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

Experimento	Cidade	Coordenadas	Altitude	Precipitação anual
<b>Exp 1</b>	Carazinho	28°19'S e 52°55'O	595 m	1821 mm
<b>Exp 2</b>	Carazinho	28°17'S e 52°47'O	617 m	1821 mm
<b>Exp 3</b>	São Miguel das Missões	28°40' S e 54°23'O	265 m	1651 mm
<b>Exp 4</b>	Tupanciretã	29°00'S e 53° 94'O	507 m	1766 mm
<b>Exp 5</b>	Palmeira das Missões	27°89'S e 53°28'O	601 m	1793 mm

Fonte: Dalla Nora (2017)

Anteriormente a implantação dos experimentos, as áreas vinham sendo manejadas sob SPD há mais de 15 anos, recebendo doses próximas a 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 75 % espaçadas em intervalos de 4 a 5 anos. Antecedendo os tratamentos as áreas experimentais foram cultivadas com a cultura da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), a qual foi quimicamente manejada com glyphosate [N-(phosphonomethyl)glycine]. Posteriormente, foi realizada à aplicação manual e de forma homogênea das doses de gesso e calcário.

A caracterização química inicial das áreas experimentais foi realizada anteriormente a implantação dos experimentos pela 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 analisados conforme metodologias descritas por Tedesco et al. (1995). O solo coletado posteriormente a aplicação dos tratamentos 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.

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merr.], quando implantada nos experimentos, recebeu em média 240 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 2-20-20 como adubação. Para a cultura do milho (*Zea mays* L.) a fertilização média utilizada foi de 190 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (N) (20 kg ha<sup>-1</sup> de N na semeadura e 170 kg ha<sup>-1</sup> de N parcelado em duas aplicações em cobertura), 120 kg ha<sup>-1</sup> de P e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K. A fonte de N foi uréia (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) (45% de N), a fonte de fósforo (P) foi superfosfato triplo Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. H<sub>2</sub>O (21% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e a fonte de K<sup>+</sup> foi cloreto de potássio (KCl) (60% de K<sub>2</sub>O). Quando implantada, a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) recebeu em média 220 kg ha<sup>-1</sup> da adubação formulada 5-25-25 e 40 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia.



Os cultivares e híbridos usados no estudo foram modernas e de alta performance: Pioneer 3069 nos Experimentos 1, 2 e 5 e Dekalb 240 nos Experimentos 3 e 4 para o milho; Nidera 5909 nos Experimentos 1, 2 e 5 e Coodetec 235RR nos Experimentos 3 e 4 para soja; Quartzo nos Experimentos 1 e 2 e BRS Tarumã nos Experimentos 3, 4 e 5 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<sup>-1</sup> com um espaçamento entre linhas de 0,50 m; a soja foi semeada na taxa de 12,0 sementes m<sup>-1</sup> (inoculada com *Bradyrhizobium japonicum*) com um espaçamento entre linhas de 0,50 m; o trigo foi semeado na taxa de 60 sementes m<sup>-1</sup> espaçadas a 0,20 m.

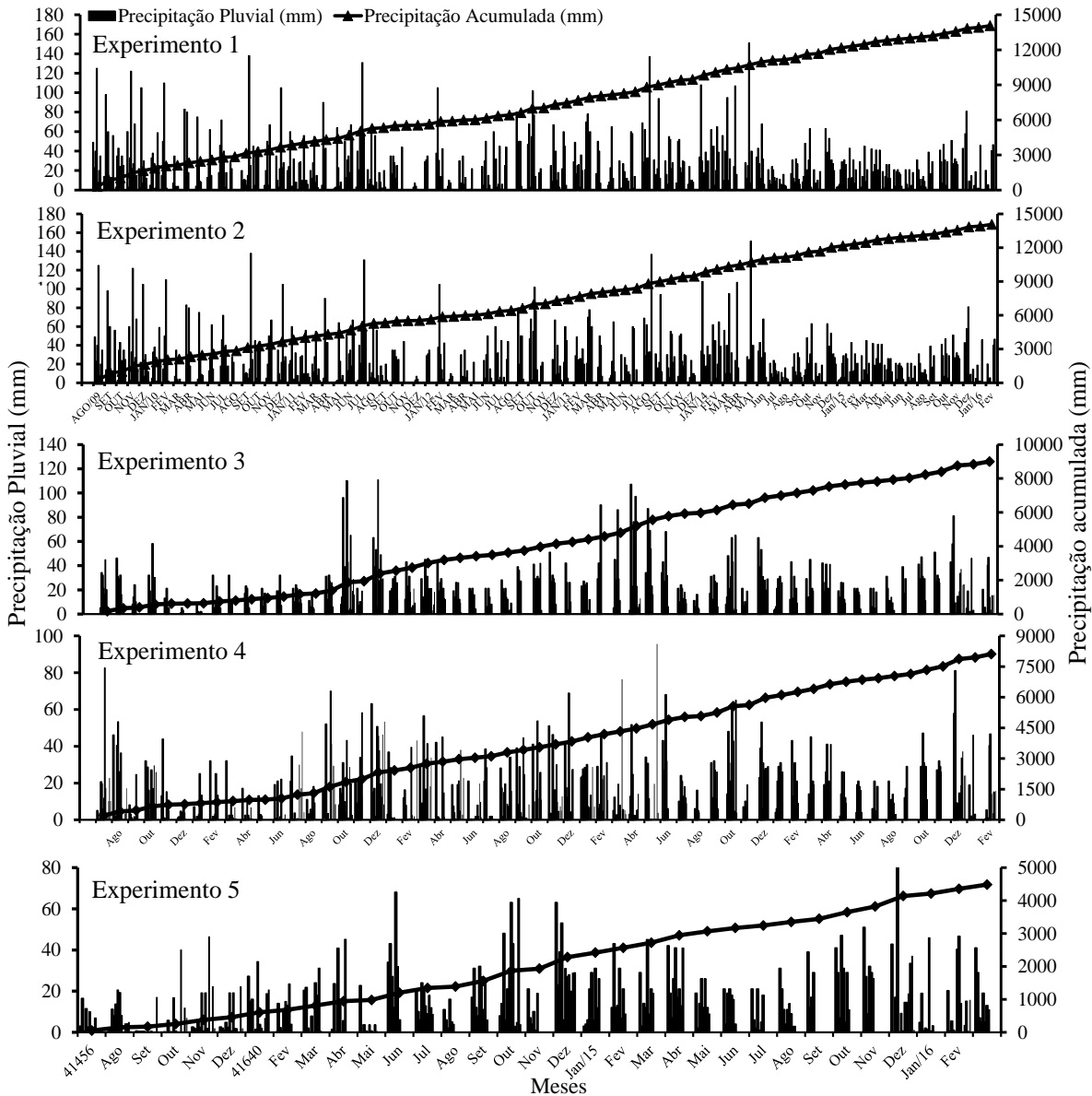
Tabela 2 - Atributos químicos avaliados anteriormente a implantação dos tratamentos nas áreas experimentais.

Prof.(m)	pH H <sub>2</sub> O	Al	Ca	Mg	K	Ca/Mg	CTC pH7,0	H+Al	P	S	SB	Sat. Al	Argila
-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----							--mg dm <sup>-3</sup> --		-----%-----		-g Kg <sup>-1</sup>		
<b>Exp 1 (Carazinho)</b>													
0,00-0,05	5,6	0,0	6,7	3,5	0,18	1,9	15,6	5,2	28,3	8,6	68,2	0	530
0,05-0,10	5,6	0,0	6,1	3,5	0,13	1,7	14,9	5,2	10,1	17,3	67,6	0	600
0,10-0,15	5,4	0,2	5,4	3,2	0,07	1,7	14,8	6,1	5,0	12,9	59,9	1,8	670
0,15-0,25	5,2	0,4	4,3	3,0	0,05	1,4	15,2	7,8	2,6	10,8	49,5	4,6	680
0,25-0,40	4,9	0,8	2,5	2,6	0,04	1,0	15,6	10,5	1,1	14,0	34,8	16,1	700
0,40-0,60	4,5	0,9	2,1	2,3	0,03	0,9	15,3	10,9	0,8	15,1	30,9	23,9	740
<b>Exp 2 (Carazinho)</b>													
0,00-0,05	5,9	0	4,9	2,2	0,40	2,2	11,6	4,1	62,8	16,9	65,6	0	240
0,05-0,10	5,7	0	4,2	2,0	0,36	2,1	10,3	3,7	27,0	14,5	64,9	0	320
0,10-0,15	5,7	0	3,3	2,0	0,35	1,6	9,7	4,0	16,6	10,4	59,1	0	370
0,15-0,25	5,4	0,2	2,6	1,8	0,33	1,4	9,4	4,7	4,07	8,05	51,4	0,3	460
0,25-0,40	5,1	0,4	2,5	1,3	0,25	1,9	11,4	7,3	2,40	9,6	37,8	8,1	500
0,40-0,60	4,8	1,2	1,8	0,7	0,17	2,5	12,2	9,5	0,97	7,2	22,3	30,9	520
<b>Exp 3 (São Miguel das Missões)</b>													
0,00-0,05	5,0	0,5	4,5	2,8	0,46	2,0	16,2	8,4	29,2	4,9	54,4	5,6	420
0,05-0,10	4,6	1,2	3,1	3,1	0,23	1,0	13,4	6,9	6,8	2,3	43,1	15,3	600
0,10-0,15	4,3	1,8	1,9	1,2	0,15	0,9	14,8	11,5	3,6	1,1	27,7	29,9	650
0,15-0,25	4,2	2,5	1,5	1,7	0,09	0,9	13,2	9,9	2,4	6,2	21,0	42,3	770
0,25-0,40	4,2	2,4	1,4	1,6	0,06	0,9	11,6	8,5	1,6	4,7	23,3	43,2	750
0,40-0,60	4,2	2,1	1,2	1,4	0,06	0,8	11,5	8,8	1,8	1,6	23,8	43,3	650
<b>Exp 4 (Tupanciretã)</b>													
0,00-0,05	6,2	0,0	6,5	3,5	0,37	1,9	12,5	2,1	14,7	5,2	82,2	0,0	295,0
0,05-0,10	6,1	0,0	4,7	2,3	0,23	2,0	10,5	3,3	12,7	5,2	68,4	0,0	335,0
0,10-0,15	5,0	0,5	2,3	2,2	0,15	1,1	12,5	7,8	10,7	4,2	37,0	9,9	400,0
0,15-0,25	4,7	1,3	1,7	1,8	0,11	0,9	13,0	9,4	4,0	2,4	28,0	25,7	440,0
0,25-0,40	4,4	2,9	1,4	1,1	0,10	1,2	20,0	17,4	2,3	5,7	13,4	52,6	500,0
0,40-0,60	4,2	4,3	1,1	0,5	0,08	1,1	22,3	20,6	0,9	12,1	9,6	66,9	610,0
<b>Exp 5 (Palmeira das Missões)</b>													
0,00-0,05	5,3	0,1	4,5	1,8	0,66	1,9	13,5	6,5	25,2	14,9	51,5	1,4	390
0,05-0,10	5,1	0,9	3,1	1,1	0,43	2,8	11,4	6,8	16,8	12,3	40,6	16,2	400
0,10-0,15	4,9	1,2	1,9	1,2	0,25	1,6	10,8	7,4	9,6	10,1	32,0	26,4	550
0,15-0,25	4,7	1,5	1,5	1,7	0,29	1,5	10,2	6,7	7,4	6,2	31,0	30,1	570
0,25-0,40	4,5	1,8	1,4	1,6	0,16	0,9	11,6	8,4	4,6	4,7	33,3	36,2	600
0,40-0,60	4,5	1,9	1,2	1,4	0,16	0,8	11,5	8,7	1,8	1,6	23,8	40,7	650

Fonte: Dalla Nora (2017); Al- Alumino, Ca- Cálcio, Mg- Magnésio, K- Potássio, Ca/Mg- Relação Ca/Mg, CTC<sub>pH7,0</sub>- Capacidade de troca de cátions a pH 7,0, P- Fósforo, S- Enxofre, V%- Saturação por bases, m%- Saturação por Al.

A precipitação diária e acumulada obtida com pluviômetros ao longo do período experimental nos cinco experimentos estudados encontra-se representada na Figura 1.

Figura 1 – Precipitação diária e acumulada desde a implantação do experimento.



Fonte: Dalla Nora (2017)

#### 9.4.1. Descrição dos experimentos de longa duração

Os experimentos de longa duração foram implantados no ano de 2009, completando 80 meses em março de 2016 quando foram realizadas as últimas avaliações.

*Experimento 1 (Exp 1):*

O experimento foi instalado na cidade de Carazinho no mês de agosto de 2009. Os tratamentos foram aplicados sobre a cultura da aveia preta, a qual foi dessecada e posteriormente foi implantada a cultura do milho. A sucessão de culturas do experimento foi a seguinte: cultura do trigo em julho de 2010; cultura da soja no mês de dezembro de 2010; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2011; cultura da soja semeada no mês de novembro de 2011; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2012 sucedida pela cultura do milho semeada no mês de setembro de 2012; cultura da aveia preta no inverno de 2013 seguido pela cultura da soja semeada no mês de abril de 2014; cultura da aveia preta durante o inverno e no mês de novembro de 2014 foi semeada a cultura da soja; cultura da aveia-preta como cobertura no inverno de 2015; cultura do milho semeada em setembro de 2015 e colhida em janeiro de 2016 encerrando o período de avaliações do experimento.

Após 10 meses da aplicação dos tratamentos foi realizada a primeira amostragem de solo. Posteriormente, foram coletadas amostras de solo 22 meses (abril de 2011), 32 meses (janeiro de 2012), 45 meses (abril de 2013), 56 meses (abril de 2014) e 72 meses (agosto de 2015) após implantação do experimento. A coleta de solo realizada aos 72 meses foi a última realizada no experimento

O experimento foi implantado em um delineamento em blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram constituídos das seguintes doses de gesso: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,5 Mg ha<sup>-1</sup>, aplicados a lanço.

*Experimento 2 (Exp 2):*

O experimento Exp 2 também foi instalado na cidade de Carazinho no mês de agosto de 2009. Os tratamentos foram aplicados sobre a cultura da aveia preta, a qual foi dessecada e posteriormente foi implantada a cultura da soja. Na sucessão foram implantadas as seguintes culturas: aveia preta consorciada com nabo forrageiro em julho de 2010; cultura do milho no mês de setembro de 2010; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2011; cultura da soja semeada no mês de novembro de 2011; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2012; cultura da soja semeada no mês de setembro de 2012; cultura do trigo no inverno de 2013; cultura da soja no mês de novembro de 2013; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2014; cultura da soja em setembro de 2014; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2015 e por fim, cultura da soja em novembro de 2015 e colhida em março de 2016, encerrando o experimento.

As profundidades de amostragem, época da realização das coletas de solo, delineamento experimental e os tratamentos adotados no Exp 2 foram os mesmos do Exp 1.

#### 9.4.2. Descrição dos experimentos de média duração

Os experimentos de média duração foram implantados no ano de 2011, completando 54 meses de aplicação dos tratamentos em abril de 2016 quando foram realizadas as últimas avaliações.

##### *Experimento 3 (Exp 3):*

O experimento foi implantado na cidade de São Miguel das Missões no mês de setembro de 2011 anteriormente a cultura da soja. Na sucessão de culturas foram implantados os seguintes cultivos: cultura do trigo durante o inverno de 2012; cultura da soja semeada em novembro de 2012; cultura do trigo durante o inverno de 2013; cultura da soja em novembro de 2013; cultura da aveia preta como cobertura no inverno de 2014; cultura da soja em novembro de 2014; cultura do centeio como cobertura no inverno de 2015 e, por fim, cultura do milho em setembro de 2015 e colhido em fevereiro de 2016 quando foi encerrado o experimento.

As amostragens de solo foram realizadas 12 meses após a implantação do experimento em setembro de 2012, após 30 meses em março de 2014 e após 54 meses em dezembro de 2015.

O Exp 3 foi composto por um delineamento de blocos ao acaso com parcela subdividida em que as parcelas principais foram formadas pelas seguintes doses de gesso: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>. As sub-parcelas foram formadas pelas doses de 0,0 e 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário aplicadas em março de 2013 e reaplicadas em março de 2015.

##### *Experimento 4 (Exp 4):*

O experimento foi implantado na cidade de Tupanciretã no mês de setembro de 2011 anteriormente a cultura da soja. Na sucessão de culturas foram implantados os seguintes cultivos: cultura do trigo no inverno de 2012; cultura da soja implantada em novembro de 2012; cultura do trigo no inverno de 2013; cultura da soja semeada em novembro de 2013; cultura do trigo no inverno de 2014; cultura da soja em novembro de 2014; cultura da aveia no inverno de 2015 e, por fim cultura da soja semeada no mês de novembro de 2015 e colhida em março de 2016 quando foi encerrado o experimento.

As amostragens de solo foram realizadas 12 meses após a implantação do experimento em outubro de 2012, após 30 meses em março de 2014 e após 50 meses em dezembro de 2015. As parcelas do experimento foram compostas por um delineamento de blocos ao acaso com

parcela subdividida em que as parcelas principais foram formadas pelas seguintes doses de gesso: 0,0; 2,0; 4,0 e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>. As sub-parcelas foram formadas pelas doses de 0,0; 2,4; 3,6 e; 4,8 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário. O gesso e o calcário foram aplicados a lanço nas parcelas experimentais.

#### 9.4.3. Descrição do experimento recentemente implantado

O experimento foi implantado em agosto de 2013, completando 30 meses de aplicação dos tratamentos em abril de 2016.

##### *Experimento 5 (Exp 5):*

O experimento foi implantado na cidade de Palmeira das Missões no mês de julho de 2013 sobre a cultura do trigo. Na sucessão de culturas foram implantados os seguintes cultivos: cultura da soja no mês de novembro de 2013; cultura da aveia como cobertura no inverno de 2014; cultura da soja semeada em novembro de 2014; cultura do trigo no inverno de 2015 e por fim, cultura da soja em novembro de 2015 e colhida em março de 2016 quando foi encerrado o experimento.

A primeira amostragem de solo foi realizada 12 meses após a implantação do experimento em julho de 2014 e a segunda aos 35 meses em junho de 2016. As parcelas desse experimento compuseram um delineamento de blocos ao acaso com parcela subdividida em que as parcelas principais foram formadas pelas seguintes doses de gesso: 0,0; 2,0; 4,0 e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>. As sub-parcelas foram formadas pelas doses de 0,0; 2,0; 4,0 e; 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário. O gesso e o calcário foram aplicados a lanço nas parcelas experimentais.

#### 9.4.4. Definição dos tratamentos

As doses de gesso médias para cada experimento foram tomadas como dose de referência, sendo determinadas de acordo com o teor de argila na camada de 0,20-0,40 m, seguindo a equação (1) (QUAGGIO; RAIJ, 1996), onde: NG= argila x 6,0.

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

NG = necessidade de gesso em kg ha<sup>-1</sup>; Argila = teor de argila no solo g kg<sup>-1</sup>.

As demais doses de gesso foram determinadas como valores acima e abaixo da dose de referência, com o intuito de ajustar uma dose ideal para as condições de cada experimento. A dose média de calcário foi estabelecida com o objetivo de atingir 65% de SB na camada de 0,00-0,20 m. A equação (1) é recomendada para situações em que os valores críticos de  $\text{Ca}^{2+} < 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e saturação por  $\text{Al}^{3+} > 20,0 \%$  na camada de 0,20-0,40 m (SOUSA; LOBATO, 2002).

O gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) utilizado nos experimentos continha em sua formulação química 21,0% de Ca, 15,5% de enxofre, 0,0024% de flúor e 0,9% de P e, em suas características físicas apresentava densidade de  $1,17 \text{ g cm}^{-3}$  e 6,5% de umidade relativa. O calcário dolomítico utilizado continha em sua formulação 29,5% de CaO, 19,5% de MgO e PRNT de 75%.

#### 9.4.5. Definição da Máxima Eficiência Técnica e Máxima Eficiência Econômica

A máxima eficiência técnica (MET) foi encontrada a partir da resolução da equação linear, a qual é o produto da derivação da equação polinomial ( $y = -0,2833x^2 + 3,0112x + 90,226$ ) entre as doses de gesso e a produtividade das culturas de soja, milho e trigo dos cinco experimentos ao longo de todo o período experimental (Figura 5).

A máxima eficiência econômica (MEE) foi obtida a partir da primeira derivada da equação polinomial originada na Figura 5 (entre a produtividade relativa das culturas e as doses de gesso), incluindo-se o preço médio dos produtos e o preço médio do insumo, tendo-se:

**Equação 2:  $dy/dx: 0 = \text{preço médio dos produtos} * (-0,5666x + 3,0112) - \text{preço médio do insumo}$**

O preço médio dos produtos foi obtido a partir da média ponderada do preço da soja, milho e trigo, constando que houve 17 safras de soja, 9 de trigo e 5 de milho. Nesse caso o valor médio ponderado dos produtos foi de R\$ 46,48.

Como o efeito do gesso ocorre ao longo prazo e houve diferentes quantidades de safras em cada experimento, foi tomado o valor de R\$ 140,00 a tonelada do gesso (preço médio no período das aplicações) e dividido pelo número de safras de cada experimento (7 safras no Exp. 1, 7 safras no Exp. 2, 6 safras no Exp. 3, 5 safras no Exp. 4 e 3 safras no Exp. 5), posteriormente foi realizado o custo médio do gesso aplicado nas cinco áreas experimentais. Dessa forma, o preço médio do insumo (gesso) por safra foi de R\$ 23,20.

Por fim, o preço médio do produto (soja, milho e trigo) foi multiplicado pela derivada da equação da MET da Figura 5. Para completar a equação, o preço médio do insumo foi subtraído da equação derivada, obtendo-se a seguinte equação para a MEE:

$$\text{MEE} = 46,48 * (-0,5666x + 3,0112) - 23,20 \quad \text{Equação 3}$$

#### 9.4.6. Descrição das principais avaliações realizadas

Para as amostras de solo foram realizadas as análises de pH H<sub>2</sub>O determinado por potenciômetro na suspensão solo-água na proporção de 1:1, teor de Al<sup>3+</sup> obtido na extração com KCL 1 mol L<sup>-1</sup> e titulado com NaOH 0,0125 mol L<sup>-1</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> obtidos na extração com KCL 1 mol L<sup>-1</sup> e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, P e K<sup>+</sup> no solo extraídos pelo método do extrator duplo ácido Mehlich-I e determinados por espectroscopia colorimétrica e fotometria de chama, respectivamente. A determinação do teor de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> foi realizada a partir da extração com fosfato de Ca<sup>2+</sup> e o sulfato mineral sendo determinado após a precipitação com solução de gelatina - BaCl<sub>2</sub> (TABATABAI; BREMNER, 1970). As metodologias realizadas estão descritas em Tedesco et al. (1995).

No período do florescimento das culturas agrícolas implantadas em todos os experimentos foi realizada a coleta de tecido foliar para realização das análises químicas de nitrogênio e cálcio de acordo com metodologias descritas em Tedesco et al. (1995). Na maturação fisiológica das culturas agrícolas, 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 plantio), e a massa de grãos corrigida para umidade de 13%.

#### 9.4.7. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, quando houve significância estatística (p<0,05) foram ajustadas as curvas de regressão para os teores de Ca<sup>2+</sup> (variável dependente) e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (variável independente), além das curvas de regressão entre os teores de Ca<sup>2+</sup> na camada sobrejacente (variável independente) e Ca<sup>2+</sup> na camada subjacente (variável dependente). A dose ideal de gesso para a MET foi obtida por meio de regressão com as produtividades relativas encontradas em todos os experimentos para todas as culturas avaliadas. O aumento do teor de nutrientes Ca e N no tecido foliar foi relacionado por meio de regressão

com as doses de gesso. As regressões foram realizadas pelo procedimento PROC REG do programa SAS (SAS INSTITUTE, 2009).

## 9.5. Resultados e Discussão

### 9.5.1. Caracterização inicial das áreas experimentais

Em relação aos critérios propostos para a recomendação de gesso agrícola, Oliveira et al. (2007) sugeriram como teores críticos de  $\text{Ca}^{2+} < 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  ou saturação por  $\text{Al}^{3+} > 10,0\%$  na camada de 0,20-0,40 m. No Sul do Brasil, o uso de gesso agrícola como condicionador de solo tem aumentado, porém, ainda inexistem critérios para a sua recomendação. Com base nos critérios apresentados anteriormente, somente os solos dos Experimentos 3 e 4 e 6 atenderiam ao critério da saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , com valores ao menos duas vezes superiores ao limite proposto (Tabela 2). No entanto, nenhum dos Experimentos investigados apresentava na condição inicial teores de  $\text{Ca}^{2+}$  inferiores ao crítico. Porém, destaca-se que o teor crítico anteriormente citado foi proposto para solos do Cerrado, nos quais a CTC geralmente é baixa ( $\cong 6,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), enquanto o presente estudo foi conduzido em solos com CTC média ( $\cong 12,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), fato que provavelmente demandaria um teor crítico de  $\text{Ca}^{2+}$  mais elevado.

Embora haja baixa probabilidade de resposta ao gesso no sul do Brasil, resultados obtidos em pesquisas realizadas em Latossolos do Paraná (PR) e RS (CAIRES et al., 2003; 2008; 2011; CAIRES, 2012; DALLA NORA et al 2013; DALLA NORA; AMADO, 2013) apontam aumentos de produtividade pelo uso do gesso, sugerindo que os parâmetros analisados para aplicação de gesso no RS podem ser outros.

As cinco áreas experimentais apresentavam importantes diferenças quanto aos índices SB e saturação por  $\text{Al}^{3+}$  ao longo do perfil do solo, devido, especialmente, pela redução do teor de  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas mais profundas (Tabela 2). Os experimentos Exp 1 e Exp 2, ambos implantados no município de Carazinho, apresentavam condições mais homogêneas, com redução mais abrupta da qualidade química a partir das camadas de 0,15-0,25 e 0,25-0,40 m, respectivamente. O Exp 3, localizado no município de São Miguel das Missões, possuía os teores mais altos de argila e o sistema de correção mais ineficiente, dado que apresentava alto teor de  $\text{Al}^{3+}$  e baixa saturação por bases (SB) ainda na superfície do solo. O Exp 4, implantado em Tupanciretã, apresentava a condição mais comum encontrada no Estado do RS. Devido as reduzidas doses de calcário aplicadas em longos intervalos de tempo, a camada superficial do



solo (0,00-0,10 m) apresenta elevada SB e não continha  $Al^{3+}$ . No entanto, a camada imediatamente inferior (0,10-0,15 m) apresentava abrupta redução da qualidade química, redução esta intensificada nas camadas mais profundas do solo. O solo do Exp 5, implantado em Palmeira das Missões, bem como o Exp 3 apresenta valores dos índices SB e saturação por  $Al^{3+}$  insuficientes para o adequado desenvolvimento da planta ainda nas camadas superficiais.

Nesse contexto, os solos dos experimentos Exp 1 e 2 apresentavam condição química da camada de enraizamento (CE) mais adequada para o desenvolvimento radicular quando comparado aos demais experimentos. Dessa forma, em situações de déficit hídrico, típicos do Estado do RS (JORIS et al., 2013; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014), as raízes das culturas irão explorar uma camada mais profunda do solo tendo acesso a volumes mais expressivos de água (SHAINBERG et al., 1989). Essa informação é relevante dado que a presença de subsolos ácidos é um dos principais fatores limitantes a obtenção de produtividades ainda mais elevadas em solos tropicais (FARINA et al., 1997)

#### 9.5.2. Dinâmica da descida do Cálcio ao longo do perfil do solo pela aplicação do gesso

Em maiores proporções, o gesso irá aportar o  $Ca^{+2}$  e o  $S-SO_4^{-2}$  que conjuntamente atuaram nas camadas subsuperficiais (RAIJ, 2010; WATTS; DICK, 2014). Como verificado na Figura 1, as condições de precipitação foram elevadas em todos os experimentos avaliados, causando rápida movimentação do  $S-SO_4^{-2}$  no perfil do solo. Ao se deslocar, esse ânion promove o deslocamento de cátions como o  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$  e, em menor quantidade,  $K^+$  (RAIJ, 2010). O incremento do teor de  $Ca^{+2}$  em subsuperfície favorece o deslocamento do  $Al^{+3}$  do complexo de troca para a solução do solo, aonde ocorre a formação do complexo  $AlSO_4^+$ . Nesse contexto, o movimento do  $Ca^{+2}$  promoverá redução da saturação por  $Al^{+3}$  e aumento da SB.

Portanto, o deslocamento do  $Ca^{+2}$  estará diretamente ligado ao movimento descendente do  $S-SO_4^{-2}$ . A fim de constatar esse carreamento foi realizada a correlação entre os níveis de  $Ca^{+2}$  e os níveis de  $S-SO_4^{-2}$  (nas respectivas camadas) do experimento Exp 3 após 30 meses da aplicação do gesso (Figura 2). Dado o elevado espaço de tempo desde a aplicação do gesso e o alto regime pluviométrico (Figura 1), não houve relação significativa ( $p > 0,05$ ) entre os teores de  $Ca^{+2}$  e  $S-SO_4^{-2}$  nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m. Foi possível verificar que os teores de  $Ca^{+2}$  foram aumentados porém os teores de  $S-SO_4^{-2}$  pouco variaram nessas camadas, podendo assim inferir que o  $S-SO_4^{-2}$  das camadas superficiais já foi lixiviado restando apenas o  $Ca^{+2}$ .

Anteriormente, Caires et al. (2011) reportaram acentuada migração do  $S-SO_4^{2-}$  das camadas superficiais para as camadas mais profundas do solo. Assim, transcorridos 30 meses da aplicação dos tratamentos, os teores de  $S-SO_4^{2-}$  na camada superficial (0,00-0,10 m) situaram-se em valores inferiores ao teor crítico [(10,0 mg  $dm^{-3}$  FONTES et al. (1982)] (Figura 2). Caires et al. (2011), em um Latossolo, observou que mesmo para doses elevadas de gesso (9,0 Mg  $ha^{-1}$ ) não foram verificados aumentos significativos de  $S-SO_4^{2-}$  na camada de 0,00-0,10 m. Portanto, o aumento do teor de  $S-SO_4^{2-}$  na camada superficial após aplicação do gesso é verificado apenas em curto prazo.

Por outro lado, na camada de 0,10-0,15 m o aumento significativo de  $Ca^{+2}$  ( $p < 0,05$ ) foi linearmente dependente do aumento do teor de  $S-SO_4^{2-}$ , em que a dose de 5,0 Mg  $ha^{-1}$  aumentou o teor de  $S-SO_4^{2-}$  para 7,5 mg  $dm^{-3}$  e, conseqüentemente, o teor de  $Ca^{+2}$  para 4,0  $cmol_c dm^{-3}$  de acordo com a equação ajustada (Figura 2). Enquanto isso, o tratamento testemunha apresentou 4,5 mg  $dm^{-3}$  de  $S-SO_4^{2-}$  e 2,4  $cmol_c dm^{-3}$  de  $Ca^{+2}$  para a mesma camada. As demais camadas profundas do solo foram afetadas de forma similar ao que ocorreu na camada de 0,10-0,15 m, porém o aumento do teor de  $Ca^{+2}$  não se deu na mesma intensidade. Isso pode ter ocorrido porque o  $Ca^{+2}$  pode ter sido retido nas cargas negativas do solo enquanto o  $S-SO_4^{2-}$  pode ter seguido o seu movimento descendente, já que os teores desse último foram cada vez mais expressivos conforme as camadas do solo avaliadas foram mais profundas (Figura 2).

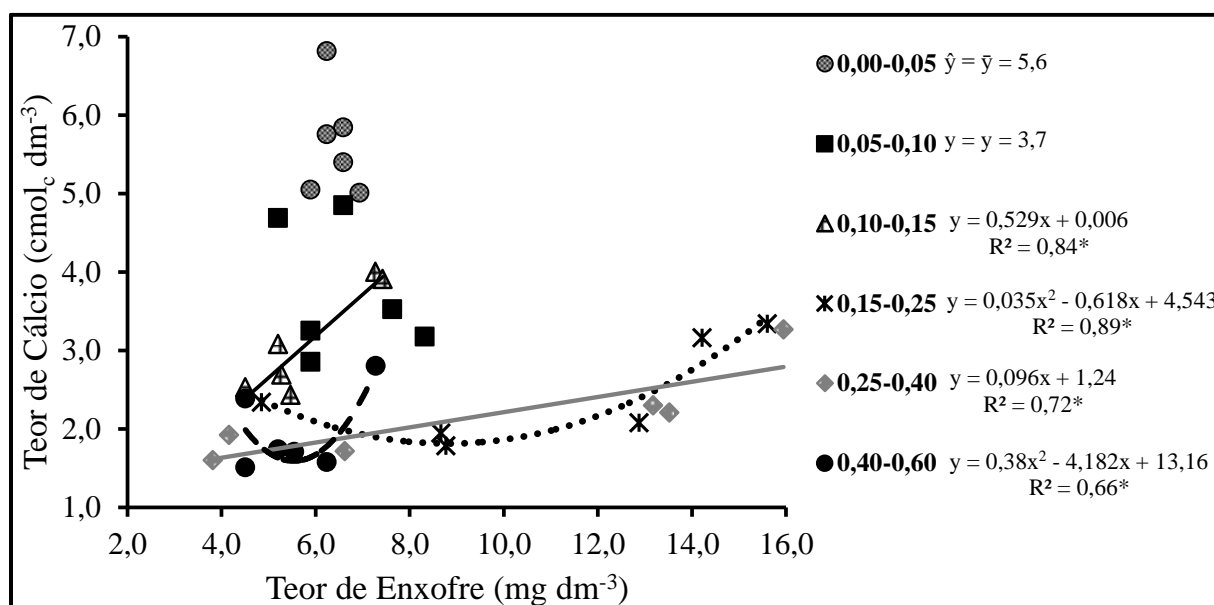
O aumento nos teores de  $S-SO_4^{2-}$  e  $Ca^{+2}$  nas camadas mais profundas do perfil após a aplicação de gesso tem sido frequentemente reportado em outros estudos (QUAGGIO et al., 1993; NOGUEIRA; MELO, 2003; FAVARETTO et al., 2008; CAIRES et al., 2011; RAMPIM et al., 2011; PAULETTI et al., 2014). Em recente estudo em um Latossolo de textura argilosa do Paraná, Pauletti et al. (2014) observaram que os teores de  $S-SO_4^{2-}$  e  $Ca^{+2}$  aumentaram até a camada de 0,80-1,00 m transcorridos 36 meses da aplicação de doses de gesso de até 12,0 Mg  $ha^{-1}$ .

O incremento nos teores de  $Ca^{2+}$  ao longo da CE é indispensável devido sua função no crescimento radicular, atuando na divisão celular (HAWKESFORD et al., 2012) e também pela elevada absorção pela coifa da raiz (TAIZ; ZEIGER, 2009). Ainda, o  $Ca^{2+}$  é praticamente imóvel no floema e sua absorção pelas raízes superficiais não atende as demandas das raízes que se desenvolvem em camadas mais profundas (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Os resultados observados na Figura 1 reforçam a premissa de que a descida do  $Ca^{2+}$  se dá pelo deslocamento do  $S-SO_4^{2-}$ , e ainda quanto mais elevados forem os teores de  $Ca^{2+}$  em superfície mais intensa será a descida desse nutriente. Isso porque, o incremento de  $Ca^{2+}$  foi

cada vem menos expressivo ao passo que aumentava-se a profundidade do solo, porém o incremento de  $S-SO_4^{2-}$  foi mais expressivo conforme a camadas do solo eram mais profundas.

Figura 2 – Relação entre o teor de Cálcio e o teor de Enxofre nas diferentes camadas após 30 meses da aplicação do gesso no experimento 3 em São Miguel das Missões. \* significativo a 5% pelo teste F.



Fonte: Dalla Nora (2017)

Para compreender a dinâmica de descida do  $Ca^{2+}$  entre as diferentes profundidades do solo foi realizada a relação do teor de  $Ca^{2+}$  entre a camada superior, considerada independente, com a camada imediatamente inferior, considerada dependente, após 30 meses da aplicação de gesso em São Miguel das Missões (Exp 3) (Figura 3). Nota-se que o incremento de  $Ca^{2+}$  das camadas subjacentes são mais expressivos a partir do aumento de  $Ca^{2+}$  da camada superior. Esse resultado supõe que o incremento de  $Ca^{2+}$  em camadas mais profundas é dependente da saturação dos teores do mesmo em camadas superiores. Assim, a elevação de  $Ca^{2+}$  em subsuperfície apenas irá ocorrer com a entrada de elevados teores de  $Ca^{2+}$  em superfície em SPD.

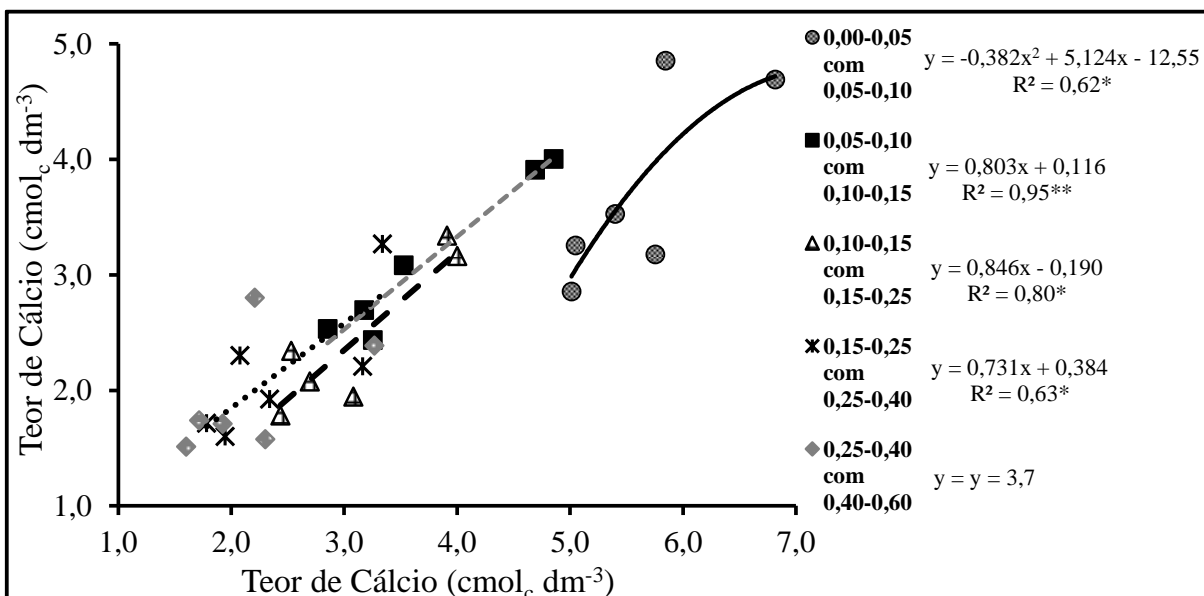
De acordo com os resultados apresentados na Figura 3, verificou-se que o valor de 6,8  $cmol_c dm^{-3}$  de  $Ca^{2+}$  na camada de 0,00-0,05 resultou no teor de 4,6  $cmol_c dm^{-3}$  de  $Ca^{2+}$  na camada de 0,05-0,10 m. Nesse contexto foi possível afirmar que após um determinado teor de  $Ca^{2+}$  em superfície houve a saturação desse elemento da referida camada, ou seja, foi encontrado o nível máximo de  $Ca^{2+}$  para aquela profundidade. A partir daí o  $Ca^{2+}$  restante

migrou com o deslocamento da água até saturar a camada imediatamente inferior (0,05-0,10 m).

Por outro lado, as camadas inferiores apresentaram relação linear positiva e significativa ( $p < 0,05$ ) entre si, ou seja, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  dessas camadas não atingiram um ponto de saturação, necessitando de incremento dos teores desse nutriente nessas camadas. No entanto, não houve relação significativa ( $p > 0,05$ ) entre a camada de 0,25-0,40 m com a camada imediatamente inferior de 0,40-0,60 m. Nesse caso, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  aportados pelas doses de gesso não foram suficientes para migrar entre as camadas até atingir a camada mais profunda (0,40-0,60 m), necessitando de doses ainda mais elevadas do insumo.

O incremento no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  ao longo da CE é importante, especialmente nas camadas mais profundas e mais ácidas (HAWKESFORD et al., 2012). O  $\text{Ca}^{2+}$  necessita estar na solução do solo próximo a extremidade das raízes, já que sua absorção é praticamente exclusiva pela coifa da raiz (TAIZ; ZEIGER, 2009). Ainda, para o processo de nodulação nas leguminosas, há maior necessidade de  $\text{Ca}^{2+}$  do que para o crescimento da planta propriamente dito (VITTI et al.; 2006). O incremento do teor de  $\text{Ca}^{2+}$ , proporcionado pela aplicação de gesso, em toda a extensão da CE em um solo ácido é relevante, uma vez que o calcário, quando aplicado na superfície de solos ácidos, raramente proporciona melhoria em camadas mais profundas que 0,00-0,10 m (CAIRES et al., 2011; BORTULUZZI et al., 2014; DALLA NORA, et al., 2014).

Figura 3 – Relação entre os teores de Cálcio de cada camada (variável independente “x”) e a camada imediatamente inferior (variável dependente “y”) após 30 meses da aplicação do gesso no experimento 3 em São Miguel das Missões. \* e \*\* significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.



Fonte: Dalla Nora (2017)

### 9.5.3. Modelo conceitual da melhoria da qualidade dos atributos químicos em subsuperfície

A aplicação do gesso tem sido uma das principais alternativas preconizadas para a melhoria da qualidade química de camadas subsuperficiais em sistemas sem mobilização mecânica do solo (JORIS et al., 2013; DALLA NORA; AMADO, 2013). O aporte de gesso afeta a relação entre cátions na solução do solo e a fase sólida do solo, favorecendo o seu incremento na solução, enquanto que o aporte de ânions, com elevada mobilidade na solução do solo, favorece o movimento vertical de cations através do solo (ALVES; OKUMA, 2011). O gesso é solubilizado em períodos mais curtos que o calcário aportando concomitantemente o  $\text{Ca}^{+2}$  e o  $\text{S-SO}_4^{2-}$  que irão atuar nas camadas subsuperficiais (RAIJ, 2010; WATTS; DICK, 2014).

Nesse contexto, buscou-se ilustrar as reações e movimentos ocorridos após a aplicação do gesso ao longo do perfil do solo desenvolvendo um modelo conceitual (Figura 4). O modelo foi realizado a partir dos resultados obtidos com a dose de  $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso após 30 meses de aplicação em Tupanciretã (Exp 4) em relação ao tratamento testemunha que não recebeu a aplicação do gesso.

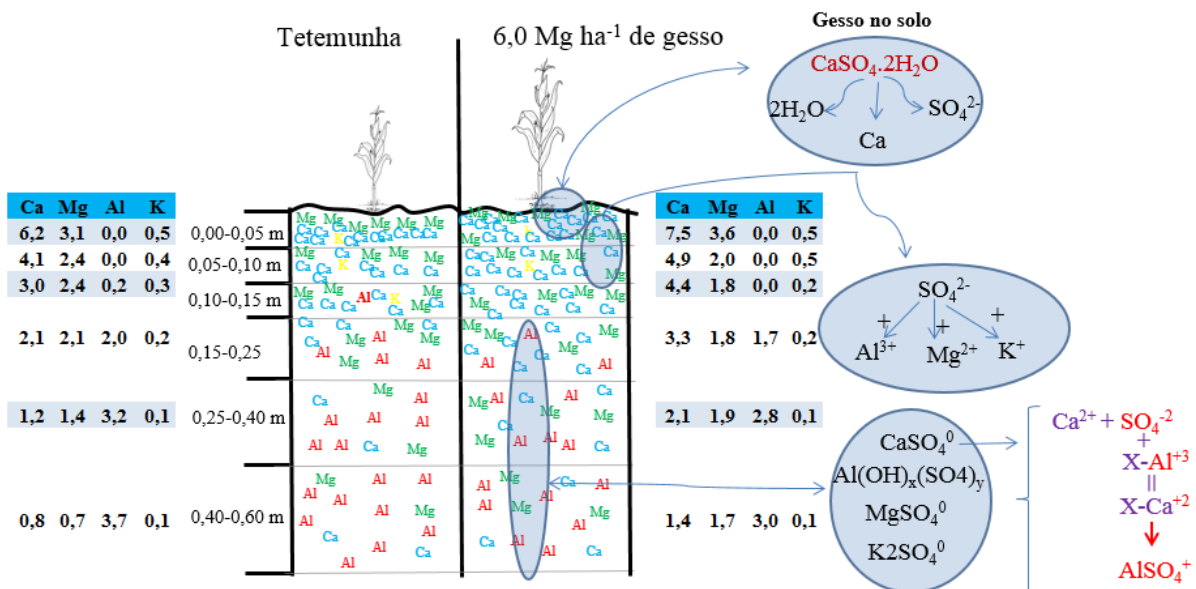
A rápida movimentação do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  no perfil do solo sob condições de precipitação elevada (Figura 1), promove o deslocamento de cátions como o  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e, em menor quantidade,  $\text{K}^+$  (RAIJ, 2010). O incremento do teor de  $\text{Ca}^{+2}$  em subsuperfície favorece o deslocamento do  $\text{Al}^{+3}$  do complexo de troca para a solução do solo, aonde ocorre a formação do complexo  $\text{AlSO}_4^+$  que é deslocado para camadas mais profundas com a água de drenagem. Este processo gradualmente contribui para o incremento da espessura da camada quimicamente melhorada (MALAVOLTA et al., 1997; NAVA et al., 2012).

Na Figura 4 observa-se que os teores de  $\text{Ca}^{+2}$  aumentaram ao longo de todo o perfil do solo para a dose de  $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso, já os teores de  $\text{Mg}^{+2}$  foram incrementados nas camadas mais profundas. Da mesma maneira foram observadas reduções dos teores de  $\text{Al}^{+3}$  nas camadas subsuperficiais do solo. Para os teores de  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ , na camada de 0,25-0,40 m, foram observados aumentos de 75 e 36% do tratamento que recebeu a dose de  $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso em relação ao tratamento testemunha, respectivamente. Já, na camada de 0,40-0,60 m, esses aumentos ocorreram na ordem de 75 e 143% para os respectivos nutrientes. Com relação ao  $\text{Al}^{+3}$  houveram reduções de 15 e 23% em relação a testemunha para as camadas de 0,25-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente.

A partir dessas alterações nas concentrações dos cátions do solo podem ser observadas reduções da saturação por  $Al^{+3}$  e aumento da SB. Porém, é importante ressaltar que essas alterações das relações dos cátions na CTC se dão pelo pronunciado aumento de  $Ca^{+2}$  e  $Mg^{+2}$  em profundidade, e, em menor parte, pela formação do par iônico  $AlSO_4^+$ . Nesse contexto, ocorre uma redução da atividade do  $Al^{+3}$  na CTC em detrimento do aumento da concentração das bases trocáveis.

Como os Latossolos distróficos tem a acidez como uma das suas principais características (JENNY, 1994), tradicionalmente a melhoria química de camadas superficiais faz-se necessária para aumentar a disponibilidade de nutriente. Recentemente, a melhoria química de camadas subsuperficiais tem sido proposta como alternativa para aprofundamento do sistema radicular e redução do efeito do déficit hídrico, situação recorrente no Estado do RS (CAIRES et al., 2008; 2011; DALLA NORA; AMADO, 2013; DALLA NORA et al., 2014).

Figura 4 – Modelo conceitual da reação do gesso ao longo do perfil do solo baseado em resultados obtidos com a dose de  $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso após 30 meses da aplicação no Exp 3 em Tupanciretã.



Fonte: Dalla Nora (2017)

#### 9.5.4. Relação entre as doses de gesso e a produtividade relativa das culturas

A produtividade relativa das culturas de soja, milho e trigo ao longo de todo o período experimental, para os cinco experimentos avaliados, apresentaram relação quadrática, positiva e significativa ( $p > 0,0001$ ) com as doses de gesso aplicadas (Figura 5). A MET foi encontrada

para a dose de 5,3 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso, atingindo a produtividade relativa de 98,3%. Enquanto isso o tratamento testemunha atingiu a produtividade relativa média de 90,2%.

A MEE, obtida através da derivação da equação quadrática da MET, atribuindo-se o preço médio dos produtos e o preço médio do insumo, foi encontrada para a dose de 4,4 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso, a qual atingiu a produtividade relativa de 97,8% (Figura 5). Destaca-se, que a proximidade da MET e MEE, no caso da aplicação do gesso, é resultado do efeito de longo prazo desse insumo, o qual afeta as diversas culturas implantadas na área experimental.

A variabilidade de locais (tipos de solo), culturas e número de safras em cada experimento comprova a eficácia do gesso nas mais diversas situações. De acordo com os resultados obtidos nesse experimento, ao longo de mais de 30 safras, observou-se que a dose de 4,4 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso ocasionou o melhor retorno econômico na média das safras e das áreas experimentais para um prazo entre 5 e 6 anos, período médio do efeito do gesso nos experimentos estudados (Figura 5).

As maiores variações de produtividade relativa entre o tratamento testemunha e a dose de máximo retorno técnico ou econômico foram encontradas nos experimentos Exp 3, Exp 4 e Exp 5 (Figura 5). Esse resultado é de grande importância, dado que os experimentos 3 e 5 foram os que apresentaram as piores condições químicas da camada de enraizamento, sendo que ambos os experimentos apresentavam qualidade química insuficiente ainda na camada superficial do solo (0,00-0,10 m) (Tabela 2). Além disso, o Exp 4 apresentou redução abrupta da qualidade química do solo entre a camada de 0,00-0,10 m e as camadas mais profundas, condição comumente observada no Estado do RS devido a aplicação superficial e insuficiente de adubação e calcário.

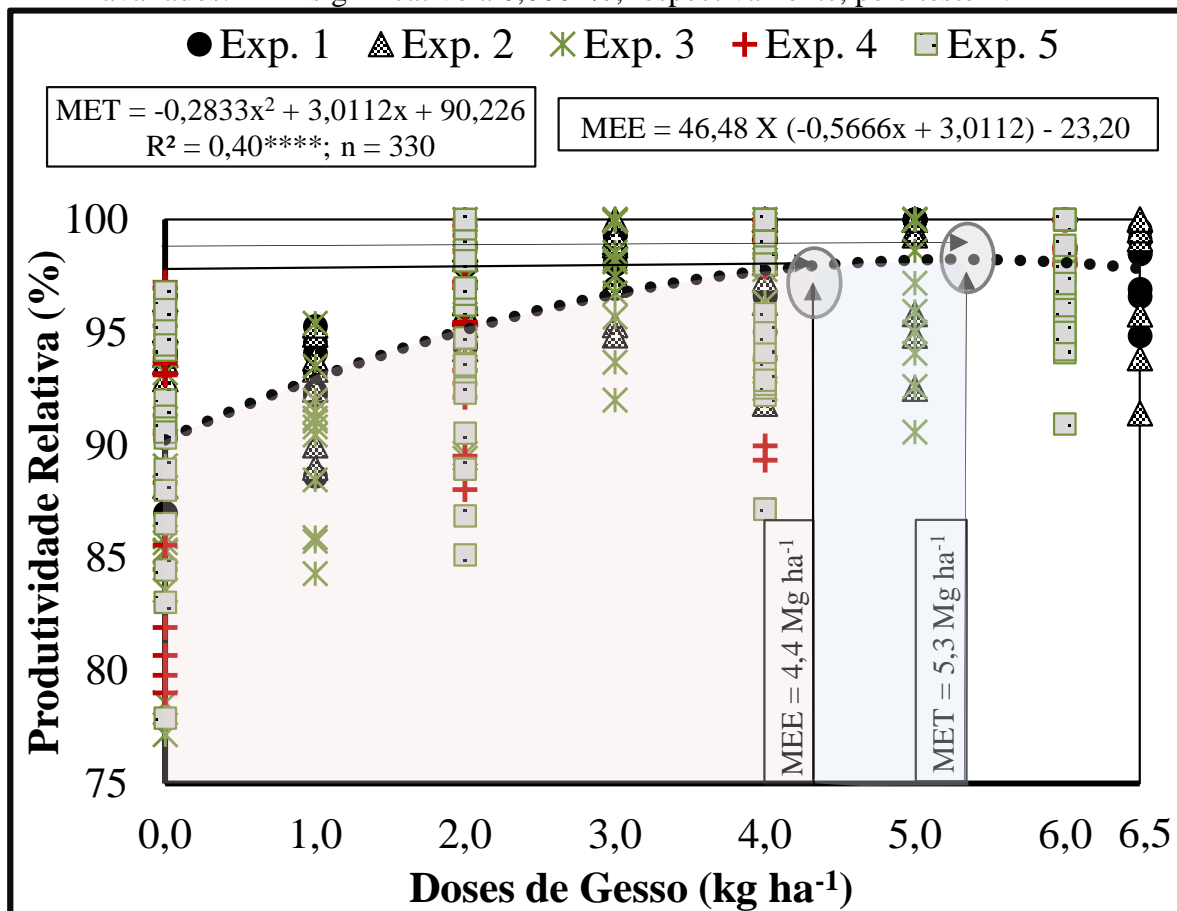
Os experimentos Exp 1 e Exp 2 apresentaram menor variabilidade entre a produtividade relativa da testemunha para com as doses de gesso que maximizaram a produtividade (Figura 5). Nesse contexto, os resultados comprovam que a formação de uma camada profunda, quimicamente melhorada, reduz a variação da produtividade ao longo dos anos para as diferentes culturas. Esse enriquecimento da CE pode ser atingido pela incorporação de calcário (BORTOLUZZI et al., 2014) ou pela aplicação superficial de gesso como representado nos resultados da Figura 5. Reitera-se que essa última alternativa não interrompe o SPD, mantendo a agregação do solo e os bioporos formados ao longo do tempo.

Resultados obtidos a partir dos anos 2000 reportados por Caires et al. (2005, 2008 e 2013); Dalla Nora et al. (2013); Dalla Nora e Amado (2013); Blum et al. (2014); Pauletti et al. (2014) e Zandoná et al. (2015) têm reportado a melhoria química da CE sob SPD pelo uso isolado do gesso ou combinado com o calcário, proporcionando aumento dos teores de Ca<sup>2+</sup> e

$Mg^{2+}$  e redução da atividade do  $Al^{3+}$  nas camadas subsuperficiais. Estes resultados reforçam a importância da correção química de uma camada solo profunda que permita o acesso da água e nutrientes móveis pelas raízes (COLEMAN; THOMAS, 1967; SHAINBERG et al., 1989; SUMNER, 1995; FARINA et al., 2000; DALLA NORA et al., 2014).

A melhoria química da camada de enraizamento é um assunto importante que requer maior número de estudos para o Estado do RS, já que diversos trabalhos têm reportado que as melhorias químicas no SPD, frequentemente, são restritas às camadas superficiais (SHAINBERG et al., 1989; BLANCO-CANQUI; LAL, 2008), criando em Latossolos distróficos um perfil não favorável ao aprofundamento do sistema radicular (CAIRES et al., 2011; BORTOLUZZI et al., 2014), elevando o risco ao estresse hídrico e a instabilidade temporal da produtividade (DALLA NORA; AMADO, 2013). O RS destaca-se entre os Estados brasileiros que, nas últimas duas décadas, apresentaram as maiores perdas de produção agrícola em decorrência de estresse hídricos de curta duração, ressaltando a importância de desenvolver estratégias de adaptação e mitigação dos sistemas agrícolas a estas condições.

Figura 5 – Máxima eficiência técnica e máxima eficiência econômica entre as doses de gesso e a produtividade relativa das culturas de soja, trigo e milho dos cinco experimentos avaliados. \*\*\*\* significativo a 0,0001%, respectivamente, pelo teste F.



Fonte: Dalla Nora (2017)



Como representado nas Figuras 2 e 3, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  foram incrementados ao longo de todo o perfil do solo, tornando a condição do ambiente subsuperficial mais favorável para o desenvolvimento radicular. Ainda, devido a reduzida mobilidade do  $\text{Ca}^{2+}$  dentro da planta e sua absorção exclusiva pela coifa da raiz, o aumento dos teores desse nutriente em profundidade podem melhorar a nutrição da planta. De acordo com os resultados apresentados na Figura 6a, o teor relativo de Ca foliar nos cinco experimentos para todas as culturas avaliadas (soja, trigo e milho) ao longo do período experimental apresentou relação positiva e significativa ( $p < 0,0001$ ) com as doses de gesso aplicadas. O máximo incremento do teor de Ca no tecido foliar foi observado na dose de  $4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso.

Especialmente em condições de déficit hídrico, o sistema radicular procura utilizar a água do solo armazenada em camadas mais profundas (SHAINBERG et al., 1989), processo que é facilitado com o incremento no teor de  $\text{Ca}^{+2}$  e a menor atividade do  $\text{Al}^{+3}$  na CE (DALLA NORA et al., 2014). Ainda, cultivares modernas de soja apresentam maior resposta ao  $\text{S-SO}_4^{-2}$  (BROCH et al., 2009) e ao incremento dos teores de  $\text{Ca}^{+2}$ , favorecendo o desenvolvimento radicular (TOMA et al., 1999).

As plantas de milho e trigo podem absorver mais  $\text{Ca}^{+2}$  com a aplicação do gesso, isso porque essas culturas apresentam raízes com CTC radicular mais baixa que as leguminosas (FERNANDES; SOUZA, 2006). Raízes com mais alta CTC acumulam íons bivalentes ao contrário de raízes com baixa CTC que absorvem com maior eficiência íons monovalentes (BROYER; STOUT, 1959). Portanto, o milho e o trigo são menos eficientes na absorção de  $\text{Ca}^{+2}$  (CAIRES et al., 2005).

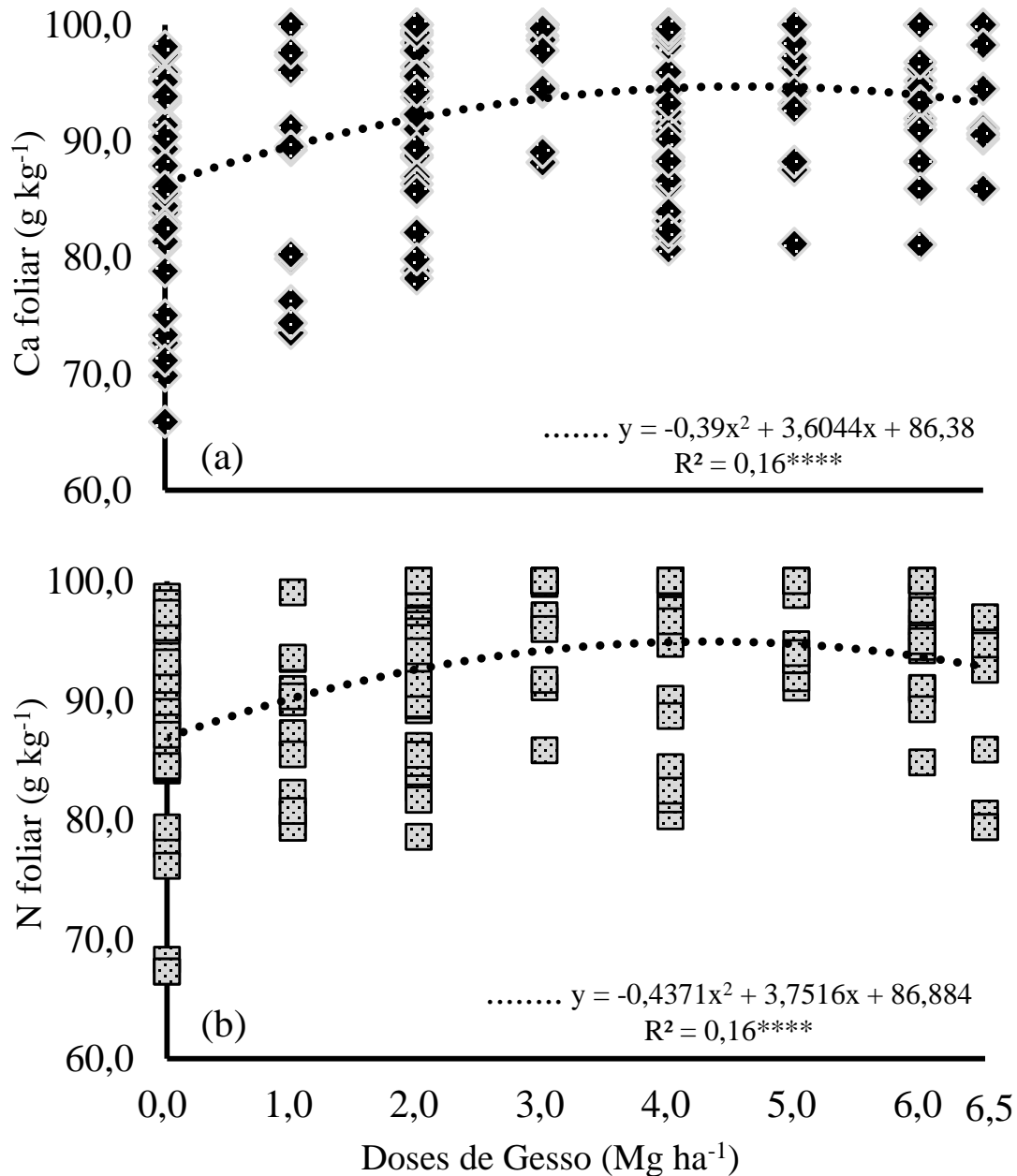
Em relação aos teores relativos de N foliar das culturas de soja, milho e trigo, determinado nas mesmas safras que o Ca foliar, também foram encontradas relações significativas ( $p < 0,0001$ ) com as doses de gesso (Figura 6b). A dose que atingiu o máximo teor relativo de N foliar foi de  $4,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso. Para a cultura da soja há maior necessidade de  $\text{Ca}^{2+}$  durante o processo de nodulação (VITTI et al; 2006), fato que pode explicar o aumento similar do teor de Ca e N foliar com a aplicação dos tratamentos.

Ainda, grande parte do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é convertido em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), o qual movimenta-se para o subsolo (CAIRES, 2013). Assim, em solos ácidos onde o teor  $\text{Ca}^{2+}$  foi incrementado com a aplicação do gesso, o sistema radicular poderá atingir camadas mais profundas, utilizando de forma mais eficiente o  $\text{NO}_3^-$ .

Destaca-se que as doses que maximizaram a absorção de N e Ca foliar foram similares a dose que atingiu a MEE ( $4,4 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso) (Figura 5). Nesse contexto, além do melhor

aproveitamento da água do subsolo, o aumento da produtividade pela aplicação do gesso pode estar associado a melhoria da nutrição da planta com Ca e N em camadas mais profundas.

Figura 6 – Relação entre as doses de gesso com o teor relativo de Cálcio foliar (a) e Nitrogênio foliar (b) das culturas de soja, milho e trigo ao longo do período experimental nos cinco experimentos avaliados. \*\*\*\* significativo a 0,0001%, respectivamente, pelo teste F.



Fonte: Dalla Nora (2017)

## 9.6. Conclusão

O aumento do teor de  $\text{Ca}^{+2}$  ao longo do perfil do solo é dependente da concentração de  $\text{S-SO}_4^{-2}$  aplicado, de modo que quanto maior a quantidade de  $\text{S-SO}_4^{-2}$  mais rápida será a descida do  $\text{Ca}^{+2}$ , já que a movimentação do  $\text{S-SO}_4^{-2}$  ocorre de maneira mais rápida que o  $\text{Ca}^{+2}$ . Ainda, a descida do  $\text{Ca}^{+2}$  é dependente da saturação do mesmo em superfície. A partir do momento em que o  $\text{Ca}^{+2}$  atinge seu ponto de saturação em superfície ele se movimenta rapidamente para a camada imediatamente inferior.

Considerando um tempo de retorno econômico de cinco a seis anos, a dose de gesso que maximiza a produtividade das culturas de soja, milho e trigo é de  $4,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ . A rentabilidade será maior em condições que ocorra abrupta transição da qualidade química da superfície do solo com a subsuperfície ou quando o solo apresente condição química insatisfatória ainda em superfície.

Com a aplicação do gesso, os teores de Ca e N foliar são incrementados na mesma ordem do aumento da produtividade. Dessa forma, além do melhor aproveitamento da água do subsolo, a planta será beneficiada pela nutrição desses dois nutrientes.

## 9.7. Referências Bibliográficas

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p.923-934, 2005.

ALVES, M.E.; D.M.; OKUMA. Anion and mineralogical effects on  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , and  $\text{Mg}^{2+}$  leaching in Oxisols. **Soil Science**. v. 176, p. 115-123, 2011.

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

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. J. 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**, v.38, p.262-271, 2014.

BROCH, D. L, et al. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. **Revista de Ciência Agronômica**, v. 42, p. 791-6, 2011.

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

BROWN, T.T. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping system. **Soil Science Society of American Journal**, 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. et al. Changes in chemical soil characteristics and soybean response to lime and gypsum applications in a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 275-286, 2003.

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

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

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, 2011.

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

CHEN, L.; DICK, W. A. Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines. **The Ohio State University Extension, Columbus**. 2011. <http://ohioline.osu.edu/b945/index.html> (accessed 4 Jan. 2017).

CICHOTA, R. I. et al. Simultaneous adsorption of calcium and sulfate and its effect on their movement. **Soil Science Society of American Journal**, v. 71, p. 703-710, 2007.

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, p. 1-41. 1967.

CROCKER, W. History of the use of agricultural gypsum. Chicago, IL: **Gypsum Industries Association**; 1922.

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.; 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**, v. 1, p. 19-29, 2014.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implantação do sistema plantio direto. **A Lavoura**, Rio de Janeiro, p. 112:20-22, 2009.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH T. Global overview of conservation agriculture adoption. In: **Proceedings of 4<sup>th</sup> World Congress on Conservation Agriculture**; 2009; New Delhi. New Delhi: Lead Paper; 2009. p. 429-38.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Embrapa- CNPS, Rio de Janeiro, 2006. 396 p.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Longterm growth effects. **Soil Science Society of America 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 America Journal**, Madson, 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.

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.

JENNY, H. Factors of soil formation: **A system of quantitative pedology**. 281p. Dover Publ, 1994: New York, NY, USA.

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.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388p.

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

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**, 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.  
NUNES, F. S.; RAIMONDI, A. C.; NIEDWIESKI, A. C. Fixação de nitrogênio: estrutura, função e modelagem bioinorgânica das nitrogenases. **Química Nova**, v. 26, p. 872-9, 2003.

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.

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

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

QUAGGIO, J. A. et al. Resposta da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, p. 375-83, 1993.

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

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

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

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.

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<sup>a</sup>.ed. Porto Alegre: Artmed; 2009.

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

TABATABAI, M. A. E BREMER, J. M. A simple turbidimetric method of determining total sulfur in plant materials. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 805-806, 1970.

TOMA, M. et al. Long-term effects of gypsum on crop yield and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of American Journal**, v. 63, p. 891-5, 1999.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. **Cálcio, magnésio e enxofre**. In: FERNANDES, M. S. (ed.). *Nutrição Mineral de Plantas*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-326.

WATTS, D. B.; DICK, W. A. Sustainable Uses of FGD Gypsum in Agricultural Systems: Introduction. **Journal Environmental Quality**, v. 43, p. 246-252, 2014.

WATTS, D. B.; TORBERT, H. A. 2009. Impact of gypsum applied to grass buffer strips on reducing soluble P in surface water runoff. **Journal Environmental Quality**, v. 38, p. 1511–1517, 2009.

WINGEYER, A. B. et al. Soil quality impacts of current South American agricultural practices. **Sustainability**, v. 7, p. 2213-224, 2015.

ZANDONÁ, R. R, et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 128-37, 2015.





## 10. ARTIGO VI – ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO DE GESSO E CALCÁRIO E SEU EFEITO SOBRE A PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

### 10.1. Resumo

A melhoria da qualidade química do solo em Sistema Plantio Direto (SPD) tem sido restringida as camadas superficiais do solo criando um gradiente de qualidade com as camadas profundas. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes alternativas de aplicação de calcário e gesso sobre os atributos químicos da camada de enraizamento e a produtividade da cultura da soja. O experimento foi conduzido em um Latossolo na cidade de Palmeira das Missões no Rio Grande do Sul (RS). As parcelas desse experimento compõe um delineamento de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos do experimento foram: Testemunha (T0); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário incorporado em 2015 (T1); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário na superfície em 2015 (T2); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário na superfície parcelado em duas aplicações (T3); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário superficial em 2013 (T4); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações (T5); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário na superfície em 2015 (T6); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações (T7); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso na superfície em 2013 (T8); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações (T9) e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso na superfície em 2013 (T10). As amostragens de solo foram estratificadas na camada de 0,00-0,60 m. Na safra de soja de 2015/16 foram avaliados os nutrientes foliares, NDVI, IAF, produtividade e componentes de produtividade. A incorporação do calcário melhorou os atributos químicos do solo quando comparado ao calcário em superfície. Já, as diferentes metodologias de aplicação de gesso influenciaram de forma semelhante os atributos químicos. Foram constatados incrementos de produtividade similares quando o calcário foi incorporado ou aplicado em superfície, ainda a aplicação parcelada do calcário não afetou a produtividade, sendo a dose calibrada para atingir 70% de SB na camada de 0,00-0,20 m a mais adequada. Para a maior dose de gesso, a aplicação parcelada foi mais eficiente. Independente da forma de aplicação, as maiores doses de gesso e calcário causaram elevação do NDVI, IAF e peso de 1000 grãos. Os teores de Ca e N foliar foram positivamente afetados pelas doses de gesso e calcário.

**Palavras-chave:** Incorporação. Saturação por bases. Subsuperfície.

## 10.2. Introdução

A expansão do Sistema Plantio Direto (SPD) proporcionou, nas últimas décadas, melhorias químicas, físicas e biológicas acompanhadas do aumento da produtividade das culturas (AMADO et al., 2009). Contudo, as melhorias vinculadas ao solo têm sido privadas às camadas superficiais em detrimento de abrupta redução da qualidade química em subsuperfície (DALLA NORA et al., 2014). Essa presença de subsolos ácidos tem sido apontada como um dos principais fatores limitantes a obtenção de produtividades ainda mais elevadas em solos tropicais (SHAINBERG et al., 1989; FARINA et al., 1997). Portanto, a melhoria da qualidade química do perfil do solo tornou-se um desafio, especialmente em ambientes sujeitos a déficit hídrico de curta duração (SUMNER, 1995; FARINA et al., 2000a). Neste contexto, sem o revolvimento do solo, esta condição de acidez em subsuperfície será mantida por longo prazo. A consequência prática será a instabilidade da produtividade, de modo que as satisfatórias produtividades obtidas em anos de precipitação favorável conduzem a falsa impressão de que o problema inexistente (DALLA NORA et al., 2014).

Algumas estratégias vêm sendo aplicadas para corrigir os problemas químicos de camadas subsuperficiais. Biologicamente, a utilização de culturas de cobertura em consórcio ou pastagens na entressafra e a adição frequente de adubação orgânica podem efetivamente contribuir para a formação de uma camada de enraizamento (CE) sob SPD. Porém, este é um processo lento e dependente da dose de adubo orgânico utilizada e intensidade dos cultivos de entressafra (BAYER et al., 2011).

Uma alternativa para formação da CE diz respeito à incorporação do calcário em SPD (KAMINSKI et al., 2005; BORTOLUZZI et al., 2014). Em trabalho realizado por Kaminski et al. (2005), foi verificado que a aplicação de doses de calcário entre 2,0 e 17,0 Mg ha<sup>-1</sup>, incorporadas antes da instalação do SPD, apresentaram aumento dos teores de nutrientes ao longo do perfil além de neutralizar a acidez do solo de forma mais eficiente do que a aplicação superficial do calcário. Entretanto, essa alternativa de interrupção do sistema, causa a desestruturação física do solo, a oxidação biológica da matéria orgânica do solo (MOS) e a exposição do solo às chuvas. Além disso, também deve ser contabilizado o gasto com diesel, emissão de gases, consumo de tempo e demanda de máquinas.

Alguns estudos têm mostrado que a aplicação de calcário em superfície sobre SPD de longa duração pode apresentar resultados semelhantes à incorporação. Estudos de longa duração sob SPD tem demonstrado 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

encontravam na camada de 0,00-0,20 m, e que 30% nas camadas do subsolo (0,20-0,60 m) independentemente se a aplicação do corretivo foi realizada na superfície ou incorporada. Ainda, Caires (2013), em um Latossolo no Paraná, demonstrou que a produção de grãos sobre SPD entre os anos de 1998 a 2003 foi semelhante, independentemente se a aplicação foi em uma única dose, parcelada em três anos ou incorporada, entretanto, o retorno econômico foi maior quando o calcário foi aplicado em superfície.

A aplicação superficial isolada do gesso agrícola ou combinada ao calcário sob SPD é uma estratégia que vem ganhando espaço (CAIRES, 2012; DALLA NORA et al., 2014). A aplicação combinada do gesso e do calcário tem revelado um efeito de interação entre os produtos, com resultados superiores ao efeito isolado de cada insumo (RAIJ, 2010). Ao passo que o calcário eleva o pH, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na superfície do solo, o gesso se dissocia liberando  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (RAIJ, 2010). Com isso, há uma rápida lixiviação do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  para as camadas mais profundas do perfil, que ao se movimentar verticalmente, favorece a descida de cátions como é o caso do  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (RAIJ, 2010). Além disso, ocorre a formação do complexo  $\text{AlSO}_4^{2-}$  que possui menor atividade e, conseqüentemente, tem seu efeito tóxico reduzido, favorecendo o desenvolvimento radicular das culturas.

Quanto ao efeito do gesso no incremento da produtividade das culturas de grãos, os resultados de experimentos têm sido divergentes e dependentes do tipo de cultura investigada (RITCHEY et al., 1982; FARINA et al., 2000 a, b; ALLEONI et al., 2005; RAIJ 1994, 2010; CAIRES et al., 2004, 2011). Farina et al. (2000a) avaliando o efeito do gesso por longo prazo (11 safras) encontrou incremento médio de  $345 \text{ kg ha}^{-1}$  na produtividade do milho. Em estudos recentes realizados por Dalla Nora e Amado (2013) e Dalla Nora et al. (2013) em Latossolos do Estado do Rio Grande do Sul, os autores verificaram aumentos da produtividade das culturas de milho e soja com a aplicações de gesso isoladamente e gesso combinado com calcário.

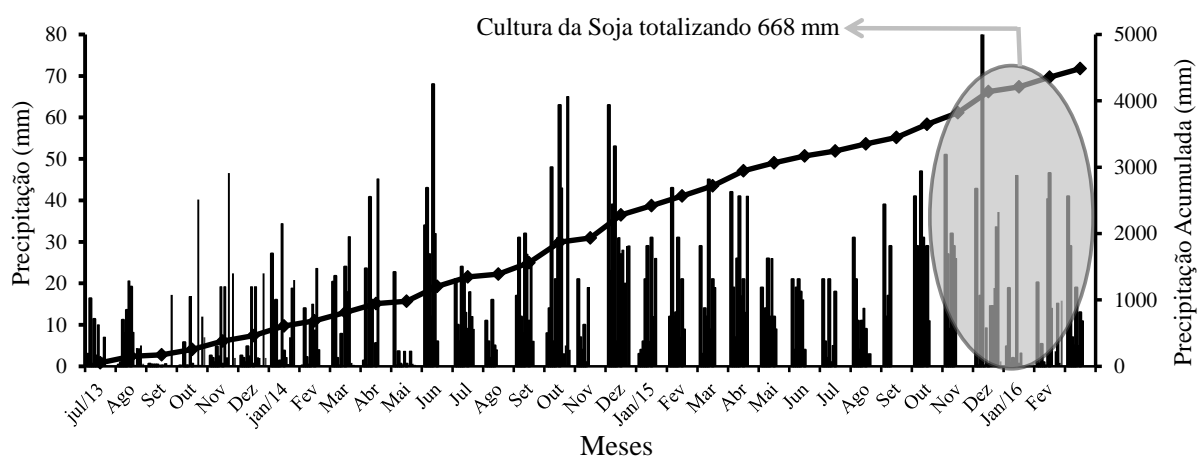
Os efeitos da aplicação do gesso isolado, combinado ao calcário ou parcelado ao longo do tempo, bem como as respostas em produtividade pela aplicação superficial ou incorporada do calcário não são claros para as condições de SPD no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Diante disso, o objetivo do presente estudo foi de avaliar o efeito de diferentes alternativas de aplicação de calcário e gesso sobre os atributos químicos da camada de enraizamento e a produtividade da cultura da soja.

### 10.3. Material e Métodos

### 10.3.1. Descrição da área de estudo

O experimento em questão localiza-se na cidade de Palmeira das Missões no RS sob um Latossolo Vermelho distrófico [Typic Hapludox - Soil Survey Staff (2010)] com textura argilosa (EMBRAPA, 2006). O experimento situa-se nas coordenadas de 27°89'S e 53°28'O, altitude de 601 m com precipitação pluvial anual de 1793 mm e temperatura média anual de 15,6°C. Segundo Köppen (1938) o clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa). A precipitação durante o período experimental está representada na Figura 1.

Figura 1 – Precipitação diária e acumulada desde a implantação do experimento.



Fonte: O autor

A área experimental vem sendo utilizada a mais de 15 anos para produção de grãos sendo manejada sob SPD e recebendo doses próximas a 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 75%, aplicadas espaçadamente em interstícios de quatro anos. A área tem recebido a cultura da soja durante o verão e trigo ou culturas de cobertura durante o inverno. Os tratamentos iniciais foram aplicados em agosto de 2013 e os tratamentos de reaplicação foram instalados em agosto de 2015, anteriormente a cultura da soja. Os atributos químicos analisados antes da implantação do experimento foram apresentados na Tabela 1.

O experimento foi implantado no mês de julho de 2013 sobre a cultura do trigo. Na sucessão de culturas foram implantados os seguintes cultivos: cultura da soja no mês de novembro de 2013; cultura da aveia como cobertura no inverno de 2014; cultura da soja semeada em novembro de 2014; cultura do trigo no inverno de 2015 e por fim, cultura da soja em novembro de 2015 e colhida em março de 2016. A cultura da soja, na safra 2015/16, recebeu

240 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 2-20-20 como adubação. A cultivar de soja foi a Nidera 6909 IPRO semeada na taxa de 12,0 sementes m<sup>-1</sup> (inoculada com *Bradyrhizobium japonicum*) com um espaçamento entre linhas de 0,50 m.

A caracterização química inicial, realizada anteriormente a implantação do experimento, procedeu-se pela coleta de cinco sub-amostras 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. Na Tabela 1 estão apresentados os atributos químicos analisados conforme metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

Tabela 1 - Atributos químicos avaliados anteriormente a implantação dos tratamentos nas seis áreas experimentais.

Prof.(m)	pH <sub>H2O</sub>	Al	Ca	Mg	K	Ca/Mg	CTC <sub>pH7,0</sub>	P	S	SB	Sat. Al	Argila
		-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						--mg dm <sup>-3</sup> --		-----%-----		-g Kg <sup>-1</sup>
0,00-0,05	5,3	0,1	4,5	1,8	0,66	1,9	13,5	25,2	14,9	51,5	1,4	390
0,05-0,10	5,1	0,9	3,1	1,1	0,43	2,8	11,4	16,8	12,3	40,6	16,2	400
0,10-0,15	4,9	1,2	1,9	1,2	0,25	1,6	10,8	9,6	10,1	32,0	26,4	550
0,15-0,25	4,7	1,5	1,5	1,7	0,29	1,5	10,2	7,4	6,2	31,0	30,1	570
0,25-0,40	4,5	1,8	1,4	1,6	0,16	0,9	11,6	4,6	4,7	33,3	36,2	600
0,40-0,60	4,5	1,9	1,2	1,4	0,16	0,8	11,5	1,8	1,6	23,8	40,7	650

Al- Alumino, Ca- Cálcio, Mg- Magnésio, K- Potássio, Ca/Mg- Relação Ca/Mg, CTC<sub>pH7,0</sub>- Capacidade de troca de cátions a pH 7,0, P- Fósforo, S- Enxofre, SB- Saturação por bases.

### 10.3.2. Delineamento Experimental

As parcelas desse experimento compuseram um delineamento de blocos ao acaso com três repetições. Cada parcela experimental tinha as dimensões de 8 m x 8 m. Os tratamentos do experimento foram: Testemunha (T0); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário incorporado no ano de 2015 (T1); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T2); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T3); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário superficial no ano de 2013 (T4); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T5); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T6); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T7); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T8); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T9) e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T10).

### 10.3.3. Definição dos tratamentos

A dose de gesso de  $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  foi determinada de acordo com o teor de argila na camada de 0,20-0,40 m, seguindo a equação (1) (QUAGGIO; RAIJ, 1996), onde:  $\text{NG} = \text{argila} \times 6,0$

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

NG = necessidade de gesso em  $\text{kg ha}^{-1}$ ; Argila = teor de argila no solo  $\text{g kg}^{-1}$ .

A equação (1) é recomendada para situações em que os valores críticos de  $\text{Ca}^{2+} < 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e saturação por  $\text{Al}^{3+} > 20,0\%$  na camada de 0,20-0,40 m (SOUSA; LOBATO, 2002). Nesse sentido, de acordo com a caracterização inicial da área experimental (Tabela 1), a aplicação de gesso seria viável apenas pelo índice saturação por  $\text{Al}^{3+}$ ,

A dose de  $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário foi estabelecida com o objetivo de atingir 65% de SB na camada de 0,00-0,20 m e a dose de  $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  tinha objetivo de atingir SB de 70% na mesma camada. De acordo com Caires (2012), a elevação da saturação por bases para 65%, em amostra de solo coletada na profundidade de 0,00–0,20 m apresentou máximo ganho de produtividade ao longo de cinco anos, já, a elevação para 70% representou o máximo ganho após 10 anos.

A incorporação do calcário foi realizada manualmente na camada de 0,00-0,20 m, também com o objetivo de atingir 65% de SB nessa mesma profundidade.

### 10.3.4. Descrição das principais avaliações

O pH em água foi determinado com pHmetro na relação 1:1 solo-água, o teor de  $\text{Al}^{3+}$  foi extraído com  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$  e titulado com  $\text{NaOH } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ , os teores de  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  foram extraídos com  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$  e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, P e  $\text{K}^{+}$  foram extraídos com solução de Mehlich-I. A concentração de P foi determinada por colorimetria usando molibdato de amônio e o teor de  $\text{K}^{+}$  foi determinado por fotometria de chama. A determinação do teor de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  foi realizada a partir da extração com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CH}_2\text{O}$  ( $500 \text{ mg L}^{-1}$  de P). Os atributos químicos foram determinados de acordo com os métodos descritos em Tedesco et al. (1995).

Durante o florescimento da soja foi realizada a coleta de tecido foliar para realização das análises químicas de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre de acordo

com metodologias descritas em Tedesco et al. (1995). Nesse mesmo período foi determinado o IAF com ajuda do sensor LAI (LAI-2200, Plant Canopy Analyzer). Além disso, foi realizada a determinação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com auxílio do sensor Green Seeker (Trimble, Sunnyvale, Califórnia, EUA).

Na maturação fisiológica da soja foram coletadas manualmente amostras para determinação da produtividade. Foram coletados quatro metros lineares das culturas (dois metros em cada linha de plantio), e a massa de grãos corrigida para umidade de 13%. Foi realizada a avaliação dos componentes de produtividade legumes por planta, grãos por legume e peso de 1000 grãos.

#### 10.3.5. Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em um modelo experimental de blocos ao acaso. Quando houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos e os atributos químicos, produtividade e atributos relacionados ao crescimento de planta foi feito o teste de Scott-Knott.

### 10.4. Resultados e Discussão

#### 10.4.1. Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos do solo

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 1, a área experimental apresentava saturação por bases (SB) abaixo de 65% na camada de 0,00-0,10 m e pH inferior a 5,5 na mesma camada, indicando elevada probabilidade de resposta ao calcário (CQFS-RS/SC, 2004). Além disso, a saturação por  $Al^{3+}$  foi maior que 20% na camada de 0,20-0,40 m, limite crítico para obter-se resposta positiva ao gesso (SOUSA; LOBATO, 2002).

O calcário aplicado em superfície no ano de 2015 (T2) incrementou a SB significativamente apenas na camada de 0,00-0,05 m, aumentando esse índice de 58,6 (T0) para 68,3% (Figura 2a). Esse resultado deve-se ao reduzido período de avaliação após aplicação do insumo (6 meses) e a lenta solubilidade do calcário.

Já, o calcário incorporado no ano de 2015 aumentou significativamente a SB até a camada de 0,15-0,25 m quando comparada ao tratamento testemunha. Porém, apenas a camada de 0,00-0,05 m apresentou valores superiores a 65%, limite mínimo proposto pela CQFS-RS/SC (2004).

A dose de 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário aplicados em 2013 apresentou incrementos significativos da SB até a camada de 0,10-0,15 m. De acordo com Caires (2012) a aplicação de doses elevada de calcário após longo período de tempo podem resultar em melhoria dos atributos químicos em camadas mais profundas devido a alguns mecanismos formados em sistema plantio direto (SPD) como: (i) deslocamento vertical de partículas finas de calcário em decorrência das condições favoráveis de estruturação do solo, e (ii) mobilização química do calcário em formas inorgânicas, principalmente nas formas de sais de nitrato e sulfato, ou ainda, nas formas orgânicas.

Todos os tratamentos que receberam gesso apresentaram incrementos na SB até a camada de 0,25-0,40 m (Figura 2a). Os aumentos significativos e mais representativos foram alcançados com o tratamento T10 que recebeu 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso. O tratamento testemunha T0 apresentou valores de SB de 58,6 e 38,8% nas camadas de 0,00-0,05 e 0,25-0,40 m, respectivamente, para as respectivas camadas o tratamento T10 apresentou valores de SB de 67,6 e 44,4%. Nesse contexto, a aplicação do gesso apresentou resultados similares a aplicação de calcário para a camada superficial do solo, porém os incrementos apresentados em camadas mais profundas e ácidas foram mais efetivos quando comparado ao corretivo. Esse resultado deve-se a maior solubilidade do gesso em relação ao calcário, resultando em elevação rápida dos teores de Ca<sup>2+</sup> na superfície do solo e posterior formação do para iônico com o sulfato SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, lixiviando para as camadas mais profundas do perfil (RAIJ, 2010). Resultados semelhantes foram reportados por Dalla Nora e Amado (2013) em Latossolos do RS.

Com relação à saturação por Al<sup>3+</sup>, os resultados foram muito semelhantes ao observada com a saturação por bases (Figura 2b). De maneira geral, os resultados mais expressivos com os tratamentos que receberam calcário se deram nas camadas mais superficiais do solo (0,00-0,10 m). Já, os tratamentos que receberam gesso atingiram melhorias nas camadas mais profundas do perfil (0,15-0,25 e 0,25-0,40 m).

O tratamento T1 que recebeu a incorporação de calcário apresentou as maiores reduções da saturação por Al<sup>3+</sup> até a profundidade de 0,15 m. Nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m o tratamento testemunha apresentou valores de 7,9; 13,4 e 10,9%, respectivamente. Já, o tratamento T1, para as respectivas camadas apresentou valores de 0,5; 2,8 e 5,7%. Tal resultado foi obtido devido a incorporação do calcário ao solo, aumentando a solubilização do insumo. Em relação as aplicações superficiais de calcário, os tratamentos T4 e T6 apresentaram os resultados mais positivos até a profundidade de 0,15 m, sendo os respectivos tratamentos representados pelas doses de 4,0 e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> aplicados em 2013. Apesar da reduzida solubilidade do calcário, o maior tempo de reação associado a elevada precipitação no

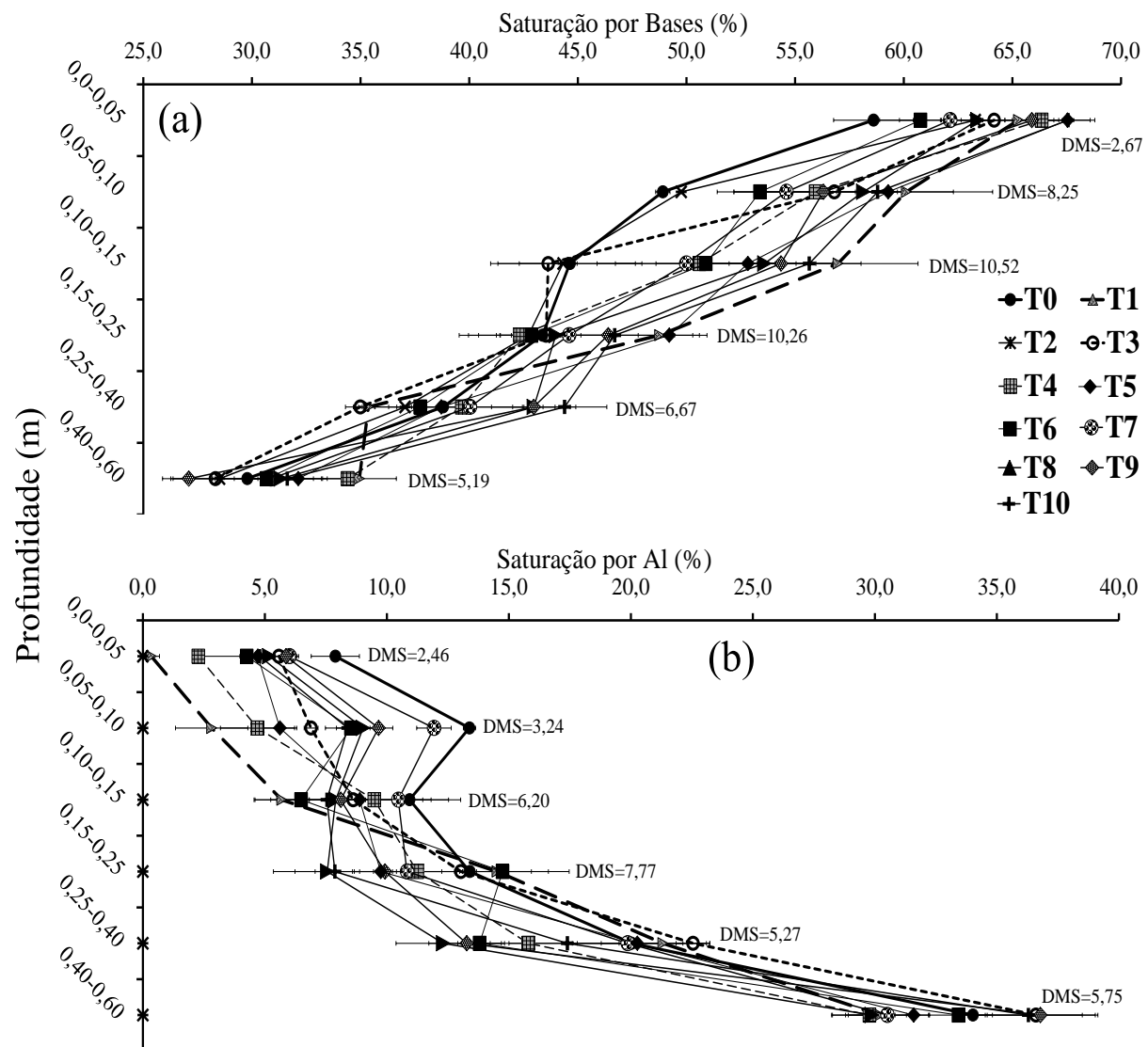


experimento (Figura 1) permitiram seus efeitos positivos mesmo quando aplicados em superfície.

Com relação aos tratamentos que receberam gesso, os resultados mais expressivos e significativos foram obtidos nas camadas intermediárias do solo (0,10-0,15; 0,15-0,25 e 0,25-0,40 m) para as maiores doses aplicadas no ano de 2013 (Figura 2b). Com maior destaque, o tratamento T8 (4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso aplicado em 2013) apresentou saturação por Al<sup>3+</sup> nas camadas de 0,15-0,25 e 0,25-0,40 m de 7,6 e 12,6%, respectivamente, enquanto o tratamento testemunha, para as respectivas camadas, apresentou valores de 13,4 e 20,0%.

A redução da saturação por Al<sup>3+</sup> com a aplicação do gesso se dá pela formação do par iônico do Al<sup>3+</sup> com o S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e, especialmente, pelo aumento dos teores de Ca<sup>2+</sup> em profundidade, reduzindo a atividade do Al<sup>3+</sup> na CTC. Como o gesso é um sal neutro, os efeitos diretos no aumento do pH do solo não são esperados. Entretanto, a reação de troca de ligantes na superfície das partículas do solo envolvendo óxidos hidratados de Fe e Al<sup>3+</sup> com o sulfato desloca o hidróxido que promove a neutralização parcial da acidez (REEVE; SUMNER, 1972). Segundo Pavan (1986), este efeito é observado com maior frequência em solos com predomínio de cargas variáveis como os Latossolos. Dessa forma parte da redução da saturação por Al<sup>3+</sup> pode estar relacionada a pequenas variações nos valores do pH.

Figura 2 – Saturação por bases (a) e saturação por  $\text{Al}^{3+}$  (b) afetadas por diferentes formas de aplicação de calcário e de gesso. Testemunha (T0); 4,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de calcário incorporado no ano de 2015 (T1); 4,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de calcário em superfície no ano de 2015 (T2); 4,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0  $\text{Mg}$ ) e a segunda em 2015 (2,0  $\text{Mg}$ ) (T3); 4,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de calcário superficial no ano de 2013 (T4); 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0  $\text{Mg}$ ) e a segunda em 2015 (2,0  $\text{Mg}$ ) (T5); 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de calcário em superfície no ano de 2015 (T6); 4,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0  $\text{Mg}$ ) e a segunda em 2015 (2,0  $\text{Mg}$ ) (T7); 4,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de gesso em superfície no ano de 2013 (T8); 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0  $\text{Mg}$ ) e a segunda em 2015 (2,0  $\text{Mg}$ ) (T9) e 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de gesso em superfície no ano de 2013 (T10).



Fonte: O autor

#### 10.4.2. Efeito dos tratamentos sobre os atributos de crescimento de planta e produtividade

De maneira geral, os tratamentos que apresentaram os maiores incrementos significativos de produtividade, mas que não diferiram entre si receberam doses de calcário (T2, T5 e T6) e apenas um tratamento que recebeu gesso (T9) (Figura 3a). A aplicação do calcário

superficial em uma dose elevada ou parcelado ao longo do tempo resultou em incremento similar de produtividade (7,9%) (Figura 3a). Já, a incorporação de calcário apresentou incremento de produtividade significativamente superior a testemunha e inferior a aplicação de altas doses de calcário em superfície.

A dose mais elevada de calcário ( $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), calibrada para atingir a SB de 70 % na camada de 0,00-0,20 m, resultou no maior incremento de produtividade da cultura da soja. Nesse contexto, além da redução do custo da incorporação, a aplicação superficial de calcário permite a manutenção do SPD impedindo que a incorporação destrua os biopóros formados e aumente a oxidação da matéria orgânica.

De acordo com Caires (2012), em estudos realizados sob Latossolos no Estado do Paraná, foi verificado que a elevação da SB para 70%, na profundidade de 0,00–0,20 m, foi um parâmetro eficiente na determinação da dose de calcário a ser aplicada na superfície do solo em SPD para ganho de produtividade ao longo de 10 anos, sendo este parâmetro mais eficiente que a incorporação de calcário. Ainda, o autor propõe que a dose de calcário prescrita possa ser aplicada sobre a superfície do solo em dose única ou de forma parcelada durante até três anos. Porém, o efeito de aplicação superficial de calcário na melhoria de atributos químicos de camadas subsuperficiais é bastante controverso na literatura, existindo relatos de efeito praticamente inexistente (BORTOLUZZI et al., 2014).

De acordo com Caires (2012), a aplicação do calcário em superfície forma uma frente de alcalinização cuja intensidade é dependente da dose e da 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 ao redor de 5,0 a 5,6 (HELYAR, 1991). Portanto, a aplicação de doses elevadas de calcário ou de doses menores, porém aplicadas de forma sequencial, é fundamental para que a zona de dissolução atinja rapidamente maiores valores de pH formando uma frente de alcalinização mais intensa. Alguns autores avaliando as camadas mais profundas do solo, definidas como abaixo dos 0,20 m, observaram que o calcário aplicado na superfície, em SPD, proporcionou alguma melhoria nas condições de acidez desta camada, entretanto foi necessário o uso de doses elevadas com frequente reaplicação ao longo tempo (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; CAIRES et al., 2008). No trabalho realizado por Oliveira e Pavan (1996) os autores concluíram que a aplicação em dose total na superfície ( $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) resultou em um leve aumento da produtividade quando comparado a aplicação parcial da mesma dose em quatro anos.

Para os tratamentos que receberam gesso (Figura 3a), o tratamento T9 o qual recebeu a maior dose do insumo ( $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), parcelada em dois anos, resultou no maior incremento de

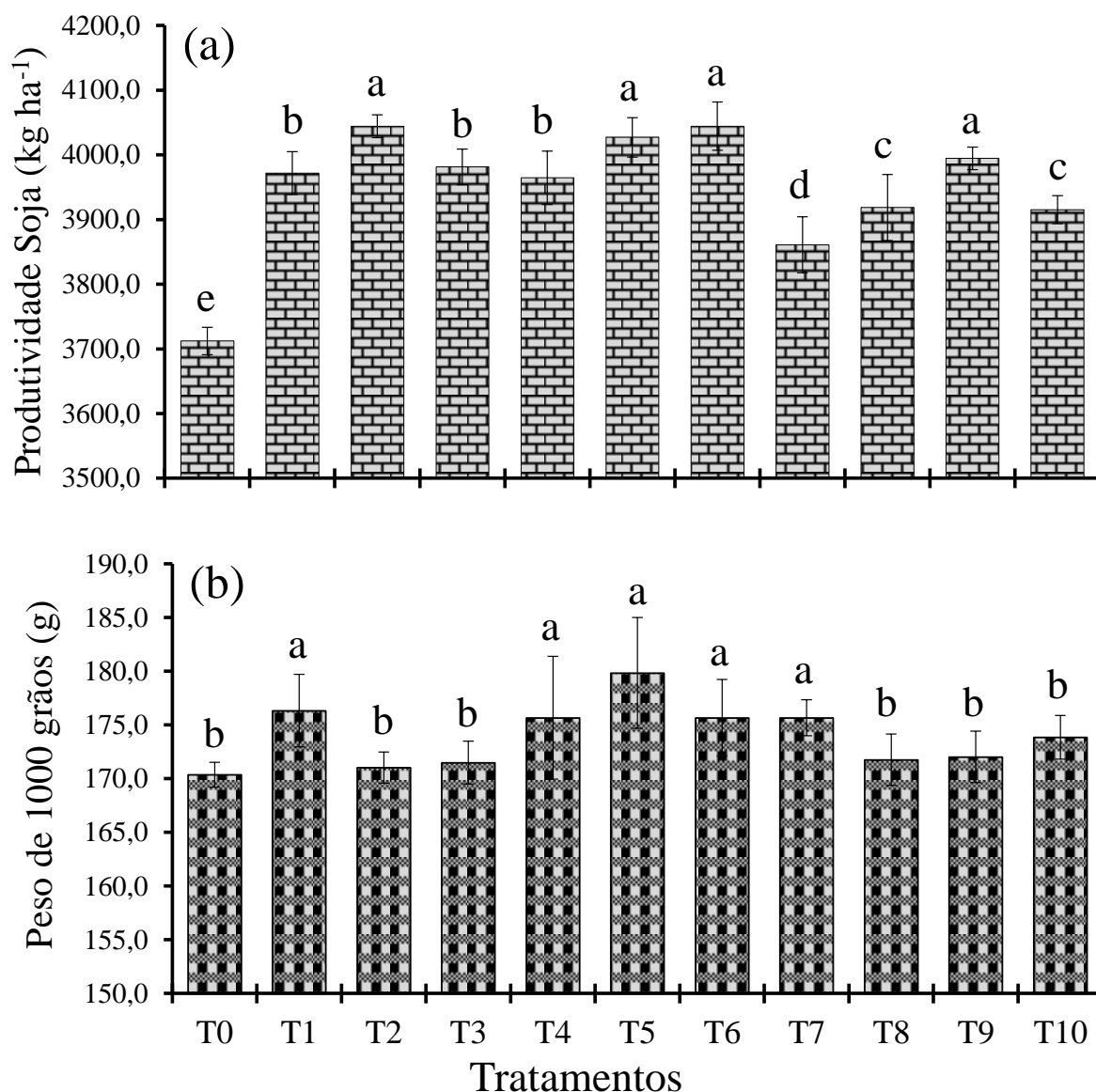
produtividade, 7,1% em relação a testemunha. Nesse caso do gesso, a reaplicação apresentou maiores incrementos de produtividade em relação a aplicação de uma única dose do insumo. Esse resultado pode estar associado a maior solubilidade do insumo, assim sua reaplicação potencializa os resultados, dado que o gesso em superfície pode ter efeito fertilizante pelo aumento rápido dos níveis de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$ .

De maneira geral, todos os tratamentos apresentaram produtividade superior ao tratamento testemunha. Sobretudo, os tratamentos que receberam calcário alcançaram, em média, a produtividade mais elevada. Esse fato está associado a qualidade química pouco favorável já na superfície do solo (Tabela 1). Todos os tratamentos que receberam gesso foram estatisticamente superiores a testemunha inferindo que a melhoria da camada de enraizamento também foi eficaz para elevação da produtividade.

Na Figura 3b foi apresentado apenas o componente de produtividade peso de 1000 grãos por ter sido o único fator que apresentou diferença significativa pela aplicação dos tratamentos. Nota-se que os tratamentos com doses mais elevadas de gesso e calcário, especialmente quando parceladas ao longo do tempo, resultaram nos maiores incrementos significativos de peso de 1000 grãos. O tratamento T5 que recebeu  $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário parcelados nos anos de 2013 e 2015 apresentou o maior incremento no peso de 1000 grãos em relação ao tratamento testemunha sendo este de 5,3%.

O componente de produtividade peso de 1000 grãos, normalmente está associado à escassez de água ou quando as condições químicas e físicas do perfil do solo não são favoráveis para o desenvolvimento radicular (SALINAS et al., 1996; DESCLAUX et al, 2000).

Figura 3 – Produtividade da soja (a) e peso de 1000 grãos (b) afetados por diferentes formas de aplicação de calcário e de gesso. Testemunha (T0); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário incorporado no ano de 2015 (T1); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T2); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T3); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário superficial no ano de 2013 (T4); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T5); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T6); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T7); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T8); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T9) e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T10).



Fonte: O autor.

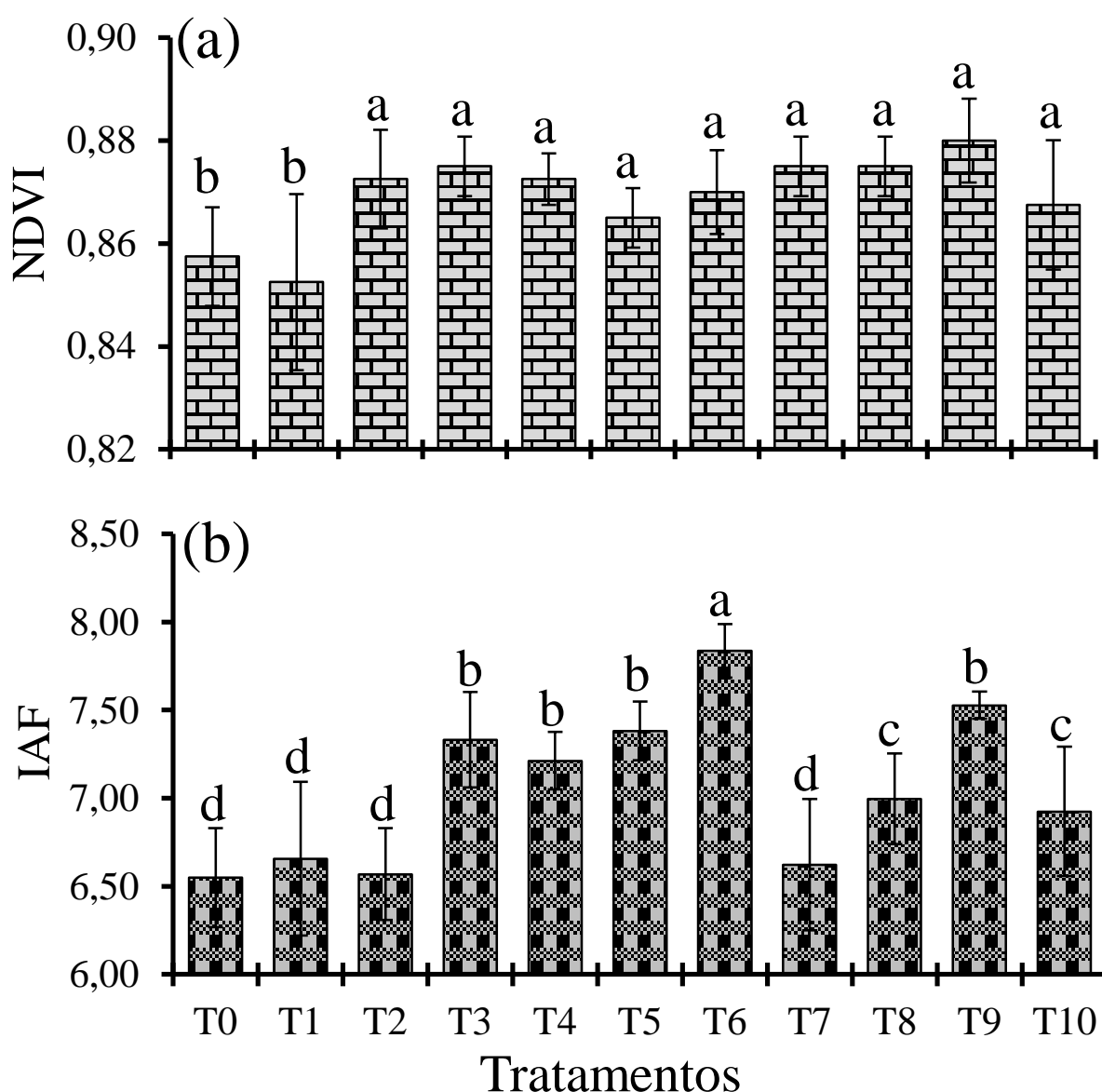
Os índices NDVI e IAF apresentaram incrementos, tanto para os tratamentos que receberam calcário (Figura 4a) quanto para os tratamentos que receberam gesso (Figura 4b). Nota-se, que em sua maioria, os resultados mais expressivos se deram nos tratamentos que receberam doses mais elevadas e parceladas ao longo do tempo (Figura 4).

Com excessão do tratamento T1, em que o calcário foi incorporado, todos os demais tratamentos apresentaram aumento significativo ( $p < 0,05$ ) do índice NDVI em relação ao tratamento testemunha. O maior incremento em relação ao tratamento T0 foi verificado no tratamento T9 (4,0 %) que recebeu  $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso parcelado em duas aplicações nos anos de 2013 e 2015 (Figura 4a).

Com relação ao índice IAF, o tratamento T6 que recebeu uma única dose de calcário no ano de 2015 foi significativamente superior aos demais, apresentando incremento de 16,4% em relação ao tratamento testemunha (Figura 4b).

O NDVI aumenta proporcionalmente ao incremento da intensidade do verde e da cobertura vegetal, sendo um dos principais índices de vegetação utilizados (ROUSE et al., 1973). O acompanhamento de safras por meio do NDVI tem sido realizado com frequência mais intensa nos últimos anos. O IAF é a relação entre a área da folhagem e a superfície do solo por ela ocupada e é variável de acordo com espécies vegetais, clima, estações do ano e estágio de desenvolvimento da planta (CÂMARA; HEIFFIG, 2000). Com o aumento do IAF e NDVI, até um valor crítico, também se aumenta a interceptação de luz e, conseqüentemente, a fotossíntese líquida. Para tal processo ser intensificado, a planta precisa estar bem nutrida e receber a quantia necessária de água, especialmente nos períodos críticos. Nesse contexto, as melhorias químicas causadas pela aplicação de gesso e calcário afetaram positivamente a produção de biomassa da planta e conseqüentemente a produtividade.

Figura 4 – NDVI e IAF da soja afetada por diferentes formas de aplicação de calcário (a) e diferentes formas de aplicação de gesso (b). Testemunha (T0); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário incorporado no ano de 2015 (T1); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T2); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T3); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário superficial no ano de 2013 (T4); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T5); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície no ano de 2015 (T6); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (2,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T7); 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T8); 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície parcelado em duas aplicações, a primeira em 2013 (4,0 Mg) e a segunda em 2015 (2,0 Mg) (T9) e 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície no ano de 2013 (T10).



Fonte: O autor; as doses iniciais de calcário e gesso foram aplicadas em 2013 e reaplicadas em 2015.

Dentre os nutrientes analisados, apenas os teores de Ca e N foliar foram afetados significativamente ( $p < 0,05$ ) pela aplicação de calcário ou gesso (Tabela 2). O tratamento T4 (4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário aplicados em 2013) apresentou o maior incremento (20,4%) nos teores

de Ca foliar em relação ao tratamento testemunha. Com relação aos tratamentos que receberam gesso, o tratamento T9 que recebeu a dose mais elevada do insumo ( $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), parcelada em duas épocas, atingiu aumento de 9,1% em relação ao tratamento testemunha, sendo este o mais expressivo entre os tratamentos que receberam gesso.

Com relação aos teores de N foliar, todos os tratamentos foram significativamente superiores ao tratamento testemunha (Tabela 2). Os tratamentos T6 ( $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário aplicados no ano de 2013) e T7 ( $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso parcelado em duas aplicações) foram significativamente ( $p < 0,05$ ) superiores aos demais tratamentos e ambos foram iguais entre si. Em média, os dois tratamentos citados foram 7,5% superiores ao tratamento testemunha.

Na planta, o cálcio é constituinte da parede celular e tem importante papel na absorção iônica (VITTI et al., 2006), sendo fundamental para o processo de nodulação nas leguminosas. Nesse contexto, todos os tratamentos que receberam calcário ou gesso aumentaram os teores de Ca no solo afetando positivamente a nutrição da planta e conseqüentemente a produtividade. Em se tratamento da cultura da soja, a nutrição mais adequado com Ca promoveu a melhor nodulação da planta elevando os teores de N foliar.

Tabela 2 – Efeito dos tratamentos com gesso e calcário sobre os nutrientes foliares da cultura da soja.

<b>Tratamentos</b> ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	<b>N</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>S</b>
	$\text{g kg}^{-1}$					
Testemunha (T0)	43,95 d	15,02 d	6,98 ns	4,50 ns	16,36 ns	2,97 ns
4,0 Mg calcário Incorporado (2015) (T1)	48,18 b	15,89 c	5,78	5,08	20,80	3,59
4,0 Mg calcário Superficial (2015) (T2)	46,67 c	14,94 d	6,53	5,27	18,70	3,49
4,0 Mg calcário Superficial [2,0 (2013) + 2,0 reaplicado (2015)] (T3)	48,88 b	16,57 c	6,68	4,52	18,89	3,07
4,0 Mg calcário Superficial (2013) (T4)	45,85 c	19,53 a	6,58	4,38	19,20	3,23
6,0 Mg calcário Superficial [4,0 (2013) + 2,0 reaplicado (2015)] (T5)	47,37 c	18,02 b	6,55	4,98	17,27	3,24
6,0 Mg calcário Superficial (2013) (T6)	51,45 a	16,89 c	7,18	4,49	17,83	2,81
4,0 Mg gesso Superficial [2,0 (2013) + 2,0 reaplicado (2015)] (T7)	52,03 a	15,07 d	6,38	4,63	20,82	3,47
4,0 Mg gesso Superficial (2013) (T8)	47,28 c	15,02 d	6,35	4,89	17,33	2,55
6,0 Mg gesso Superficial [4,0 (2013) + 2,0 reaplicado (2015)] (T9)	49,35 b	17,07 c	6,85	5,26	18,30	3,79
6,0 Mg gesso Superficial (2013) (T10)	48,92 b	16,22 c	6,17	4,80	23,30	3,61
<b>Médias</b>	<b>48,80</b>	<b>18,98</b>	<b>6,43</b>	<b>6,55</b>	<b>3,26</b>	<b>48,18</b>
<b>CV (%)</b>	<b>3,80</b>	<b>2,60</b>	<b>10,25</b>	<b>11,30</b>	<b>15,55</b>	<b>15,11</b>

Fonte: O autor.



## 10.5. Conclusões

A incorporação do calcário melhorou os atributos químicos do solo quando comparado ao calcário em superfície. Já, para a aplicação de gesso, as diferentes metodologias de aplicação influenciaram de forma semelhante os atributos químicos com resultados mais evidentes para as doses mais elevadas.

Foram constatados incrementos de produtividade similares quando o calcário foi incorporado ou aplicado em superfície, ainda a aplicação parcelada do calcário não afetou a produtividade, sendo a dose calibrada para atingir 70% de SB na camada de 0,00-0,20 m a mais adequada. De maneira semelhante, a aplicação parcelada da menor dose de gesso foi similar a aplicação de uma única dose. Já, para a maior dose de gesso, a aplicação parcelada foi mais eficiente.

Independente da forma de aplicação, as maiores doses de gesso e calcário causaram elevação do NDVI, IAF e peso de 1000 grãos. O Ca e o N foliar foram positivamente afetados pelas doses de gesso e calcário.

## 10.6. Referências Bibliográficas

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p.923-934, 2005.

AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 831-843, 2009.

BAYER, C. et al. 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.

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**, v.38, p.262-271, 2014.

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

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; GARBUIO, F. J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, p.357-364, 2002.

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, 2011.

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.

CÂMARA, G.M.S.; HEIFFIG, L.S. **Fisiologia, ambiente e rendimento da cultura da soja**. In: CÂMARA, G.M.S. Soja: tecnologia da produção. Piracicaba: ESALQ/LPV, 2000. p. 81-120.

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**, v. 1, p. 19-29, 2014.

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.

DESCLAUX, D.; HUYNH, T.; ROUMET P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science Society American**, v. 40, p. 716-722, 2000.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Embrapa- CNPS, Rio de Janeiro, 2006. 396 p.

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

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

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: II. Longterm soil effects. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 64, p. 652–658, 2000b.

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.

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**, v.29, p.573-580, 2005.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1938. 388p.

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.

PAVAN, M. A. **Comportamento do gesso nos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais**. Piracicaba, POTAFOS - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1986. 3p. (Informações Agronômicas, 35).

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

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

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

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.

ROUSE, J. W. et al. **Monitoring vegetation systems in the great plains with erts**. In: EarthResourcesTechnologySatellite-1 Symposium, 3, 1973, Washington, D. C. Proceedings... Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973, v. 1, p. 309-317. (NASA SP-351).

SALINAS, A. R. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, p. 331-338, 1996.

SHAINBERG, I. et al. Use of gypsum on soils. **Advanced 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.

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.

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

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. **Cálcio, magnésio e enxofre**. In: FERNANDES, M. S. (ed.). *Nutrição Mineral de Plantas*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-326.

## 11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos ao longo dos estudos desenvolvidos na presente Tese foi possível caracterizar e compreender os efeitos do gesso agrícola aplicado isoladamente ou combinado com o calcário sobre os atributos químicos do solo em áreas manejadas sob SPD no Estado do Rio Grande do Sul, e assim, entender sobre quais aspectos esses insumos contribuem para o aumento da produtividade das culturas agrícolas. A partir do reconhecimento das camadas e atributos do solo que estão envolvidos com o aumento da produtividade das culturas foi possível estimar parâmetros e recomendações mais adequadas para as áreas agrícolas do sul do Brasil, facilitando a tomada de decisões por parte de técnicos e agricultores. Ainda, aspectos mais conclusivos sobre o efeito residual e a intensidade dos benefícios do gesso foram compreendidos.

Os resultados desse trabalho foram e serão de grande impacto, considerando que o efeito do gesso aplicado isoladamente ou combinado com calcário foi capaz de suprir, de forma parcial, os déficits hídricos frequentemente observados no Rio Grande do Sul, fazendo desses insumos uma estratégia viável diante das épocas de baixa precipitação. O uso de gesso e calcário, mesmo em condições onde não eram recomendados, tem potencialidade para aumentar ainda mais os tetos de produtividade das culturas agrícolas diante dos materiais genéticos de alto desempenho presentes no mercado. Além disso, foi possível determinar o sistema de manejo mais adequado para melhorar a produtividade das culturas e os atributos do solo, evitando a interrupção do SPD pela incorporação do calcário.

Em estudo futuros, propõe-se a avaliação dos efeitos do gesso isolado ou combinado com o calcário sobre os atributos físicos do solo. Em especial, ao que diz respeito a agregação do solo e redução da resistência a compactação. Os aumentos dos teores de cálcio e maior crescimento radicular melhoram a agregação do solo podendo reduzir a compactação, problema recorrente no Estado.



## 12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p.923-934, 2005.
- AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 831-843, 2009.
- AMADO, T. J. C. et al. Potential of Carbon Accumulation in No-Till Soils with Intensive Use and Cover Crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, v. 35, p. 1599-1607, 2006.
- ANJOS, L. H. C. et al. (ed.) Pedologia: Fundamentos. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 343p, 2012.
- BAYER, C. et al. 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.
- BERWANGER, A. L.; CERETTA, C. A.; RHEINHEIMER, D.S. Alterações no teor de fósforo no solo com aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2525-2532, 2008.
- 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**, 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. 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. (Informações Agronômicas, 141)
- CAIRES, E. F. et al. Changes in chemical soil characteristics and soybean response to lime and gypsum applications in a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 275-286, 2003.
- 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. 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, 1999.

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. et al. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, p. 370-379, 2006.

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

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

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

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.

CAMARGO, O. A.; RAIJ, B. VAN. Movimento de gesso em amostras de solo com diferentes propriedades eletroquímicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p. 275-280, 1989.

CLARK, R. B. et al. Maize growth and mineral acquisition on acid soil amended with flue gas desulfurization by-products and magnesium. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madson, v. 28, p. 1441-1459, 1997.

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.

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, p. 1-41. 1967.

CORRÊA, J. C.; BARILLI, J.; REBELLATTO, A. **Aplicações de Dejetos de Suínos e as Propriedades do Solo**. Embrapa. 2011. (Circular Técnica)

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**, v. 1, p. 19-29, 2014.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implantação do sistema plantio direto. A Lavoura, Rio de Janeiro, p. 112:20-22, 2009.

EL-SHIKHA, D. M. et al. Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. **Agriculture Water Management**, Madson, v. 92, p. 183-193, 2007.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Embrapa- CNPS, Rio de Janeiro, 2006. 396 p.

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

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P. Acid subsoil amelioration I: Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 52, p.175-180, 1988.

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

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: II. Longterm soil effects. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 64, p. 652–658, 2000b.

FAVARETTO, N. et al. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium affecting phosphorus and nitrogen in runoff. **Soil Science Society American Journal**, v. 70, p. 1788-1796. 2006.

FAVARETTO, N. et al. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium effects on plant nutrition underconditions of intensive nutrient extraction. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, 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.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C. Cama sobreposta e dejetos líquidos de suínos como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n.1, p. 195-205, 2008.

GIRARDELLO, V. C. et al. Tráfego controlado de máquinas agrícolas: a experiência inglesa e perspectivas de adoção no Sul do Brasil. **Revista Plantio Direto**, v. 137-138, 2013.

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.

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**, v.29, p.573-580, 2005.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388p.

MARKET, C. M.; PAVAN, A. M. A.; LANTMANN, A. F. **Considerações sobre o uso do gesso na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p.3. (Informativo agrônômico n. 40).

MARQUES, R. R. **Aplicação superficial de calcário e gesso em manejo conservacionista de solo para cultivo de amendoim e aveia branca**. 2008. 142 f. (Doutorado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern : International Potash Institute, 1987. 687p.

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 409-416, 2010.

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.

PAVAN, M. A. **Comportamento do gesso nos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais**. Piracicaba, POTAFOS - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1986. 3p. (Informações Agrônômicas, 35).

QUAGGIO, J. A. et al. Soybean responses to lime and gypsum and ion leaching into the soil profile. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, p. 375-383, 1993.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B.VAN. **Correção da acidez do solo**. In: RAIJ, B. V. et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas. 1996. p.14-19. (Boletim Técnico, 100).

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

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. **Agrochimica**, 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.

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. (Org.). Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute - Brasil (IPNI), 2010, v.1, p.383-420.

SANTOS, H.G. et al. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

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

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 675-688, 2008.

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.

STOUT, W. L.; SHARPLEY, A. N.; PIONKE, H. B. Reducing soil phosphorus solubility with coal combustion by-products. **Journal Environment Quality**, Madson, v. 27, p. 111-118, 1998.

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.

TABATABAI, M. A. E BREMER, J. M. A simple turbidimetric method of determining total sulfur in plant materials. **Agronomy Journal**, Madson, v. 62, p. 805-806, 1970.

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

URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. Porto Alegre: **Gênesis**, 2000. 110p.

XUE, L. H. et al. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. **Agronomy Journal**, Madson, v. 96, p. 135-142, 2004.